

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
CAMPUS DE ITABIRA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Wander Pinto Ribeiro

**APLICAÇÃO DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA OTIMIZAÇÃO ROBUSTA NO
FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205**

Itabira

2023

Wander Pinto Ribeiro

**APLICAÇÃO DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA OTIMIZAÇÃO ROBUSTA NO
FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205**

Dissertação submetida ao Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira para a obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção – Mestrado Profissional.

Orientador: Prof. Dr. Tarcísio Gonçalves de Brito
Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Albergaria Oliveira

Itabira

2023

Ficha catalográfica

R48o Ribeiro, Wander Pinto
Aplicação do Erro Quadrático Médio para Otimização Robusta no Fresamento de Topo do Aço Inoxidável Duplex UNS S32205 / Wander Pinto Ribeiro. -- Itabira, 2023.
115 f. : il. ; color. ; tab. ; quad.

Orientador: Prof. Dr. Tarcísio Gonçalves de Brito
Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Albergaria Oliveira

Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Produção) - Instituto de Engenharias Integradas, Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira, 2023.

1. Fresamento de Topo. 2. Projeto de Parâmetro Robusto (PPR). 3. Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). 4. Erro Quadrático Médio (EQM). I. Brito, Tarcísio Gonçalves de. II. Oliveira, Leonardo Albergaria. III. Título.

Wander Pinto Ribeiro

**APLICAÇÃO DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA OTIMIZAÇÃO ROBUSTA NO
FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Tarcísio Gonçalves de Brito
Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira

Prof. Dr. Leonardo Albergaria Oliveira
Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira

Prof. Dr. Emerson José de Paiva
Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira

Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Universidade Estadual Paulista - UNESP

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção – mestrado profissional obtido pelo Mestrado Profissional em Engenharia de Produção.

Coordenação do Mestrado Profissional em Engenharia de Produção

Prof. Dr. Tarcísio Gonçalves de Brito
Orientador

Itabira, julho de 2023

Dedico o resultado deste trabalho a Deus que me sustentou para chegar ao final do curso.

Dedico também aos meus pais, Cícero e Salete, pelo incentivo e por não medir esforços para que todos os filhos pudessem, dentro de suas possibilidades, estudar.

À minha esposa, Sueli, pela paciência, companheirismo, incentivo, dedicação e força durante essa caminhada. Aos meus filhos, Camila e Gabriel, pelo apoio e compreensão nos momentos de ausência.

Às minhas irmãs e irmão, Wanete, Waldinéia, Walmir e Wanilda, pelo apoio irrestrito.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade.

Aos Professores Doutor Tarcísio Gonçalves de Brito e Doutor Leonardo Albergaria Oliveira, orientador e coorientador, pelo apoio, incentivo, puxões de orelha e auxílio nos momentos difíceis.

Ao Professor Doutor Carlos Henrique de Oliveira que, mesmo durante seu doutorado, sempre encontrava um tempo em sua agenda para esclarecer dúvidas.

A todos os demais Professores que, direta ou indiretamente, auxiliaram na elaboração deste trabalho.

Aos meus colegas de mestrado pelos momentos de compartilhamento de dúvidas, ajuda nos momentos de perrengues, estudo em grupos.

À minha família pelo apoio, companhia, incentivo.

“Educar verdadeiramente não é ensinar fatos novos ou enumerar fórmulas prontas, mas sim preparar a mente para pensar.”

Albert Einstein

RESUMO

As pesquisas sobre o fresamento de topo do aço inoxidável duplex ganharam destaque devido aos desafios encontrados em função de suas características de baixa usinabilidade. O aço inoxidável duplex apresenta baixa condutividade térmica, alta ductilidade e alta taxa de encruamento. Para garantir boa qualidade final em produtos manufaturados, é importante que o processo de fresamento seja bem planejado para minimizar os desgastes das ferramentas de corte durante o processo e, ao mesmo tempo, apresentar bons indicadores de produtividade. O objetivo deste trabalho foi aplicar um método de otimização robusta multiobjetivo no processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205. Os experimentos foram realizados utilizando-se um planejamento composto central combinando as variáveis de controle: velocidade de corte, avanço por dente, profundidade de corte e largura fresada e as variáveis de ruído: desgaste de flanco, vazão de fluido e concentração de fluido. As variáveis de respostas avaliadas foram as rugosidades de superfície R_a e R_t da peça usinada. Foram aplicadas as técnicas de metodologia de superfície de resposta, de projeto de parâmetro robusto e do erro quadrático médio. Em seguida, foram analisados e discutidos os efeitos das variáveis de controle e de ruído, bem como as interações. A velocidade de corte foi a variável que mais influenciou a rugosidade R_a . A rugosidade R_t foi influenciada pelo avanço por dente. O valor obtido para a rugosidade R_a variou entre 0,243 e 1,097 μm e 1,800 e 7,058 μm para R_t . A otimização da média e da variância de cada característica de interesse foi realizada, bem como a otimização do erro quadrático médio. As 21 soluções Pareto-ótimas foram obtidas, contribuindo para a melhoria da qualidade da superfície e da produtividade no processo de fresamento. Para os ensaios de confirmação foi utilizado um arranjo ortogonal de Taguchi (L9) onde foram obtidos os *setups* ótimos capazes de mitigar a influência das variáveis de ruído, o que corroborou a boa adequação da metodologia proposta.

Palavras-chave: Fresamento de Topo. Projeto de Parâmetro Robusto (PPR). Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). Erro Quadrático Médio (EQM). Otimização.

ABSTRACT

Research on duplex stainless steel end milling has gained prominence due to the challenges encountered due to its low machinability characteristics. Duplex stainless steel has low thermal conductivity, high ductility and a high work hardening rate. To ensure good final quality in manufactured products, it is important that the milling process be well planned, to minimize the wear of the cutting tools during the process and at the same time present good productivity indicators. The objective of this work is to perform a robust multi-objective optimization in the end milling process of duplex stainless steel UNS S32205. The experiments were performed using a central composite design combining the control variables: cutting speed, feed per tooth, depth of cut and milled width and the noise variables: flank wear, fluid flow rate and fluid concentration. The response variables evaluated were the surface roughness R_a and R_t of the machined part. Response surface methodology, robust parameter design, and mean square error techniques were applied. Then, the effects of the control and noise variables, as well as interactions, were analyzed and discussed. The cutting speed was the variable that most influenced the roughness R_a . Roughness R_t was influenced especially by the feed per tooth. The values obtained for roughness R_a ranged between 0.243 and 1.097 μm and 1.800 and 7.058 μm for R_t . The optimization of the mean and variance of each characteristic of interest was performed, as well as the optimization of the mean square error. Thus, 21 Pareto-optimal solutions were obtained, contributing to the improvement of surface quality and productivity in the milling process. For the confirmation tests, an orthogonal Taguchi arrangement (L9) was used where the optimal setups capable of mitigating the influence of noise variables were obtained, which corroborated the good suitability of the proposed methodology.

Keywords: *End Milling. Robust Parameter Design (RPD), Response Surface Methodology (RSM). Mean Square Error (MSE). Optimization.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fresamento de topo	27
Figura 2 - Tipos de corte: discordante e concordante.....	28
Figura 3 - Posicionamento da aresta de corte	29
Figura 4 - Metal duro: (A) grãos médios a grossos; (B) grãos finos	35
Figura 5 - Desgaste de flanco	35
Figura 6 - Desgaste de cratera	36
Figura 7 - Desgaste de entalhe.....	36
Figura 8 - Deformação plástica da aresta de corte.....	37
Figura 9 - Lascamento	37
Figura 10 - Trincas	37
Figura 11 - Aresta postiça de corte	38
Figura 12 - Desgaste uniforme de flanco	40
Figura 13 - Rugosidade média (R_a).....	41
Figura 14 - Linha Média.....	43
Figura 15 - Rugosidade R_t	45
Figura 16 - Diagrama esquemático da formação do cavaco.....	46
Figura 17 - Superfícies de resposta para modelos linear e quadrático	55
Figura 18 - Tipos de arranjo CCD: (A) circunscrito; (B) face centrada; (C) inscrito	57
Figura 19 - Representação esquemática de um processo	59
Figura 20 - Centro de usinagem Eurostec	64
Figura 21 - Fresa de topo R390-025A25-11M	65
Figura 22 - Inserto de metal duro R390-11T308M-MM 2030.....	65
Figura 23 - Montagem do microscópio	67
Figura 24 - Rugosímetro portátil utilizado nos experimentos	68
Figura 25 - Processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205	69
Figura 26 - Fluxograma do método experimental	70
Figura 27 - Montagem do corpo de prova: (1) ferramenta; (2) corpo de prova; (3) dispositivo de fixação do corpo de prova; (4) mesa fresadora.....	74
Figura 28 - Registro da rugosidade: (1) rugosímetro; (2) corpo de prova.....	75
Figura 29 - Teste de normalidade ($\alpha = 0,05$) para R_a	84
Figura 30 - Teste de normalidade ($\alpha = 0,05$) para R_t	84

Figura 31 - Efeito da interação entre velocidade de corte e avanço por dente sobre a rugosidade R_a (μm).....	86
Figura 32 - Efeito da interação entre velocidade de corte e penetração de trabalho sobre a rugosidade R_a (μm).....	87
Figura 33 - Efeito da interação entre velocidade de corte e avanço por dente sobre a rugosidade R_t (μm)	87
Figura 34 - Efeito da interação entre velocidade de corte e penetração de trabalho sobre a rugosidade R_t (μm)	88
Figura 35 - Gráfico de contorno para rugosidade R_a	88
Figura 36 - Gráfico de contorno para rugosidade R_t	89
Figura 37 - Fronteiras de Pareto: (A) média e variância R_a , (B) média e variância R_t ; (C) para o par EQM R_a , EQM R_t	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais técnicas de DOE	52
---------------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comprimento da amostragem para perfis aperiódicos	42
Tabela 2 - Valores de rugosidade	45
Tabela 3 - Composição química do aço inoxidável duplex UNS S32205 (% em peso)	64
Tabela 4 - Variáveis de controle e respectivos níveis	66
Tabela 5 - Variáveis de ruído e níveis correspondentes	67
Tabela 6 - Planejamento experimental	71
Tabela 7 - Resultados experimentais	76
Tabela 8 - Coeficientes estimados para a rugosidade R_a	80
Tabela 9 - Coeficientes estimados para a rugosidade R_t	81
Tabela 10 - Sumários dos modelos.....	82
Tabela 11 - Análise de Variância para a rugosidade R_a	82
Tabela 12 - Análise de Variância para a rugosidade R_t	83
Tabela 13 - Parâmetros robustos ótimos para o fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205	91
Tabela 14 - Parâmetros otimizados para R_a e R_t	93
Tabela 15 - Parâmetros robustos ótimos para o fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205	95
Tabela 16 - Resultados dos experimentos de confirmação.....	96
Tabela 17 - Análise de variância para experimento de confirmação de R_a	97
Tabela 18 - Análise de variância para experimento de confirmação de R_t	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CCC	Arranjo Composto Circunscrito
CCD	Arranjo Composto Central ou Box-Wilson Central Composite Design
CCF	Arranjo de Face Centrada
CCI	Arranjo Composto Inscrito
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DOE	Projetos de Experimentos ou Design of Experiments
EQM	Erro Quadrático Médio ou Mean Square Error (MSE)
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
NBR	Norma Brasileira
OLS	Mínimos Quadrados Ordinários ou Ordinary Least Square
S/N	Relação Sinal/Ruído
WLS	Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) ou Weighted Least Square
TiN	Nitreto de titânio
PPR	Projeto de Parametro Robusto

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

v_c	Velocidade de corte	m/min
f_z	Avanço por dente	$mm/dente$
a_e	Penetração de trabalho	mm
a_p	Profundidade de usinagem	mm
R_a	Rugosidade média	
R_t	Rugosidade total	
T_y	Alvo da resposta y	
v_b	Desgaste de flanco da ferramenta	
w	Peso atribuído para a resposta	
x	Variáveis independentes	
y	Resposta de interesse	
Z_1	Desgaste de flanco v_b Ruído	
Z_2	Concentração do fluido (C)(%) Ruído	
Z_3	Vazão do fluido (Q)(ml/min) Ruído	
m/min	Metro por minuto	
mm	Milímetros	
Valor P	probabilidade estimada	
R_2	Coefficiente de determinação	
$R_2(adj)$	Coefficiente de determinação ajustado	
r	Ângulo de posição da ferramenta	

Letras Gregas

α	Distância dos pontos axiais em relação aos pontos centrais
β	Coefficiente do modelo matemático a ser estimado
ε	Erro experimental
μ	Média experimental da resposta
σ	Desvio-padrão experimental da resposta
σ^2	Variância
Σ	Somatório
r	Espaço experimental

Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
CCC	Arranjo Composto Circunscrito
CCD	Arranjo Composto Central ou Box-Wilson <i>Central Composite Design</i>
CCF	Arranjo de Face Centrada
CCI	Arranjo Composto Inscrito
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DOE	Projeto de Experimentos ou <i>Design of Experiments</i>
EQM	Erro Quadrático Médio ou <i>Mean Square Errors (MSE)</i>
IMOA	Associação Internacional de Molibdênio (<i>International Molybdenum Association</i>)
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
NBR	Norma Brasileira
OLS	Mínimos Quadrados Ordinários ou <i>Ordinary Least Square</i>
S/N	Relação Sinal/Ruído
WLS	Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) ou <i>Weighted Least Square</i>
TiN	Nitreto de Titânio
PPR	Projeto de Parâmetro Robusto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
1.2. OBJETIVO	19
1.3. OBJETIVOS ESPECIFICOS	19
1.4. IMPORTÂNCIA DO TEMA	20
1.5. LIMITAÇÕES	20
1.6. CONTEÚDO	21
2. REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1. AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX.....	23
2.2. PRINCÍPIO DA OPERAÇÃO DE FRESAMENTO	26
2.3. ESCOLHA DA FRESA PARA OPERAÇÕES DE SUPERFÍCIE PLANA	28
2.3.1. Diâmetro da fresa	28
2.3.2. Número de dentes	29
2.4. MATERIAIS PARA FERRAMENTAS	32
2.4.1. Materiais para fresa	33
2.4.2. Metal duro revestido (HC).....	34
2.5. DESGASTE DA FERRAMENTA.....	35
2.5.1. Avarias das ferramentas	36
2.5.2. Mecanismos de desgastes das ferramentas.....	38
2.5.3. Medição do desgaste da ferramenta de corte.....	39
2.6. INTEGRIDADE SUPERFICIAL.....	40
2.6.1. Sistemas de medição da rugosidade.....	42
2.6.2. Parâmetro de rugosidade (R_a)	44
2.6.3. Parâmetro de rugosidade (R_t).....	45
2.6.4. Mecanismo de formação do cavaco.....	45
2.7. FLUIDO DE CORTE	46
2.7.1. Fluido de corte nos processos de usinagem	47
2.7.2. Funções dos fluidos de corte	47
2.7.3. Os fluidos de corte como refrigerante.....	48
2.7.4. Os fluidos de corte como lubrificante	48
2.7.5. Classificação dos fluidos de corte.....	49

2.7.6. Óleos integrais.....	50
2.7.7. Fluidos miscíveis em água.....	50
2.7.8. Emulsões.....	50
2.8. PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS (DOE).....	51
2.9. METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA (MSR).....	54
2.10. ARRANJO COMPOSTO CENTRAL (CCD).....	57
2.11. PROJETO DE PARÂMETRO ROBUSTO (PPR).....	58
2.12. ARRANJO COMBINADO.....	61
2.13. OTIMIZAÇÃO ROBUSTA DAS CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE.....	62
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	64
3.1. MATERIAL.....	64
3.2. MÁQUINA E FERRAMENTAS.....	64
3.3. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS.....	66
3.4. INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO.....	67
3.5. PROBLEMA DE PESQUISA.....	68
3.6. MÉTODO EXPERIMENTAL.....	70
3.7. DEFINIÇÃO DA MATRIZ EXPERIMENTAL.....	71
3.8. EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	73
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	79
4.1. MODELAGEM MATEMÁTICA DAS RESPOSTAS.....	79
4.2. ADEQUAÇÃO E AJUSTE DOS MODELOS.....	82
4.3. ANÁLISE DOS EFEITOS DAS INTERAÇÕES.....	85
4.4. OTIMIZAÇÃO DAS RESPOSTAS R_a e R_t	89
4.5. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....	95
4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97
5. CONCLUSÕES.....	99
5.1. CONCLUSÕES DOS ENSAIOS.....	99
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	100
REFERÊNCIAS.....	101

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A usinagem tem papel de destaque entre os vários processos de fabricação dos mais variados ramos da indústria metalmeccânica. Dentre os processos de usinagem, o fresamento é visto como um dos mais importantes em função de sua produtividade e flexibilidade uma vez que a fresa pode se apresentar sob variadas formas, conferindo a essa operação um caráter versátil em termos de geometrias possíveis de serem geradas, podendo usinar variados formatos de peças (DINIZ *et al.*, 2014). Toda essa flexibilidade tem seu lado negativo que é o fato de existirem muitas variáveis que são incorporados ao processo, dificultando sua otimização (BRITO, 2012).

Assim, a otimização do processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 torna-se uma tarefa de grande importância na redução dos tempos e custo de fabricação de peças. Durante o processo de fresamento, o desempenho do conjunto máquina-ferramenta-peça-máquina se mostra mais complexo em função da descontinuidade do corte e do número de variáveis, o que dificulta o estabelecimento de um modelo que relacione o comportamento da superfície usinada e o desgaste das ferramentas de corte com a variação dos parâmetros de usinagem.

Nos últimos anos, ocorreram avanços tecnológicos significativos tanto nos materiais quanto nas máquinas-ferramentas, resultando em um considerável aumento na demanda por fluidos de corte. Essa crescente demanda impulsiona a competição no mercado, o que, por sua vez, requer um aprimoramento na qualidade dos produtos. Além disso, há uma pressão crescente por parte das Agências de Proteção Ambiental e de Saúde para que os produtos sejam comercializados com maior segurança e causem menos impacto ambiental, bem como para que ofereçam menos riscos aos operadores (MACHADO *et al.*, 2009). Muitos estudos na literatura estão relacionados aos fluidos de corte em contextos de usinagem, onde esses fluidos desempenham um papel fundamental na lubrificação e refrigeração das peças produzidas (DENKENA *et al.*, 2022; KATNA *et al.*, 2020; KUMAR *et al.*, 2022), bem como a redução do desgaste das ferramentas de corte (DINIZ *et al.*, 2014; MACHADO *et al.*, 2009; TRENT e WRIGHT, 2000).

O desgaste das ferramentas é uma variável de difícil controle, pesquisadores têm se dedicado a buscar condições de fresamento que garantam um melhor acabamento e integridade da superfície usinada (OLIVEIRA *et al.*, 2022; OLIVEIRA *et al.*, 2020; PAIVA *et*

al., 2009). Isso se torna essencial para atender às demandas por peças cada vez mais sofisticadas, ao mesmo tempo em que se mantém um alto padrão de qualidade e eficiência na manufatura.

A necessidade de tornar os processos mais eficientes e econômicos impulsionou o desenvolvimento de diversos métodos de otimização ao longo das últimas décadas. Métodos como o projeto de parâmetros robustos (PPR), conforme Montgomery (2017), é uma abordagem utilizada para análise e melhoria de processos cujo foco é a determinação dos níveis de controle visando os seguintes objetivos: (a) garantir que a média das respostas do processo se estabeleça em nível desejado e (b) garantir que a variabilidade em torno dos valores alvo seja a menor possível. Assim, a utilização de ferramentas estatísticas como o Projeto e Análise de Experimentos permite a compreensão a respeito de um dado fenômeno, contribuindo consideravelmente para a melhoria da eficiência dos processos e aumento dos níveis de qualidade dos produtos.

O objetivo do projeto de parâmetros robustos é minimizar a variabilidade transmitida pelas variáveis de ruído ao sistema. Dessa forma, algumas variáveis de ruído devem ser adequadamente selecionadas de forma que seja proporcionada variação nas variáveis de resposta do sistema. Embora existam outras variáveis de ruído no processo de fresamento, somente as condições da ferramenta nova / desgastada e a concentração e vazão de fluido foram selecionadas por gerar parte da variação nas diversas condições de ensaio.

1.2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é otimizar o processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS 32205 com ferramenta de metal duro, com arestas de corte novas e desgastadas usando variadas condições de lubri-refrigeração, minimizando as variáveis de respostas R_a e R_t .

1.3. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Desdobrando o objetivo geral, chega-se aos seguintes objetivos específicos:

- A obtenção de modelos para rugosidade contemple efeitos de interação ruído-controle e que exibam altos ajustes R^2 (adj.) acima de 70%;
- Desenvolver uma formulação para o método EQM que simplifique a estrutura matricial das restrições por um sistema de equações não redundantes;

- Desenvolver uma estratégia para os experimentos de confirmação necessários à verificação dos resultados matemáticos baseada em arranjos ortogonais de Taguchi, assim como determinar o número de experimentos de confirmação necessários para se testar a redução da variância e a melhoria do valor médio da característica de interesse (Y), adequados a um poder de teste $(1-\beta)$ maior do que 80%, com nível de significância de $\alpha = 5\%$;
- Analisar e discutir os resultados encontrados do ponto de vista do processo de fresamento.

1.4. IMPORTÂNCIA DO TEMA

A metodologia do Projeto de Parâmetros Robustos (PPR), originalmente apresentada por Taguchi (1986), visa otimizar o projeto de um produto ou processo na Engenharia, de modo a torná-lo robusto em relação aos efeitos dos ruídos que causam variabilidade no desempenho (BOX *et al.*, 1988). Neste contexto, esta pesquisa tem como objetivo aplicar a metodologia PPR no processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205, considerando tanto as variáveis de controle quanto as variáveis de ruído que exercem uma influência significativa na rugosidade de superfície da peça.

1.5. LIMITAÇÕES

Este trabalho apresenta algumas limitações fundamentais que merecem ser destacadas para uma compreensão completa de seu escopo e aplicabilidade. Em primeiro lugar, o estudo concentra-se exclusivamente no desenvolvimento e aplicação de um método de otimização para resolver problemas relacionados à média e variância das respostas R_a e R_t . O método escolhido é o modelo quadrático, especificamente o EQM (Erro Quadrático Médio), excluindo assim a consideração de outros algoritmos de busca ou abordagens de otimização. Portanto, é importante ressaltar que a pesquisa não abrange a comparação com métodos alternativos, como restrições normais ou somas ponderadas adaptativas, restringindo seu escopo a uma abordagem específica.

Além disso, a implementação do método de otimização proposto será realizada exclusivamente por meio do *software* Excel, destinado a problemas não-lineares. Isso implica que outros *softwares* ou técnicas de otimização não serão explorados ou inferidos no contexto deste estudo, limitando-se à aplicação do EQM no ambiente do Excel.

No que diz respeito ao arranjo experimental, a pesquisa se baseia em um projeto central composto (CCD) para coletar dados e supervisionar as respostas. Isso significa que as comparações com outras técnicas, como *Box-Behnken* ou fatoriais relacionados, não são abordadas neste trabalho. Além disso, combinações cruzadas de variáveis não foram consideradas, o que pode restringir a compreensão completa do problema e as possíveis soluções.

No contexto do processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205, a pesquisa se concentra em ferramentas novas e desgastadas. No entanto, outras variáveis que podem afetar o processo, como o balanço da ferramenta e vibrações, não foram abordadas nesta pesquisa. Essa limitação pode deixar espaço para estudos futuros que explorem essas variáveis adicionais e sua influência no processo de fresamento.

Por fim, é importante destacar que os resultados obtidos neste estudo são específicos para o processo de fresamento investigado e não podem ser generalizados para outros processos de usinagem envolvendo materiais diferentes. Portanto, a aplicabilidade dos resultados está restrita a esse contexto particular, e outras aplicações requerem investigações separadas.

Em resumo, este trabalho apresenta limitações relacionadas à abordagem de otimização, ao *software* utilizado, ao arranjo experimental, aos fatores do processo de fresamento considerados e à generalização dos resultados, todas essas limitações são importantes para uma compreensão completa do alcance do trabalho e suas implicações para pesquisas futuras.

1.6. CONTEÚDO

Este trabalho está organizado em seis capítulos. Além deste primeiro, que apresenta os pressupostos iniciais, os capítulos seguintes tratam dos assuntos a saber:

Capítulo 2: Apresenta uma síntese sobre a revisão da literatura com apresentação dos principais conceitos relacionados ao processo de fresamento e informações acerca do aço inoxidável duplex. Quanto às técnicas de otimização, são abordados o projeto e análise de experimentos DOE, Metodologia de Superfície de Respostas, Projeto de Parâmetro Robusto (*PPR*) e Erro Quadrático Médio (*EQM*).

Capítulo 3: Descreve o método experimental utilizado, o detalhamento dos equipamentos, ferramentas e materiais utilizados para a usinagem e medição dos corpos de prova.

Capítulo 4: Apresenta a modelagem das respostas, otimização do Erro Quadrático Médio (EQM), possibilitando encontrar o melhor parâmetro de máquina-ferramenta e validação dos resultados.

Capítulo 5: Apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX

Aços inoxidáveis constituem material à base de ferro com teor de cromo acima de 12%. Tal característica faz com que a resistência à corrosão aumente, progressivamente, devido à formação de uma fina película protetora de óxido de cromo (Cr_2O_3), chamada de camada passiva. Dentre todos os tipos de aços, os inoxidáveis são os mais diversos e complexos no que se refere à composição, microestrutura e propriedades mecânicas. Eles apresentam ampla gama de aplicações que englobam desde a indústria química, farmacêutica e de geração de energia a situações menos agressivas como na arquitetura, na indústria de eletrodomésticos, mobiliário urbano, dentre outros (LLEWELLYN e HUDD, 1998).

O aço inoxidável duplex (*Duplex Stainless Steel* – DSS) surgiu na França no fim da década de 1920, a partir da adição de elementos de liga durante a fusão do aço inoxidável austenítico (*Austenitic Stainless Steel* – ASS), resultando numa composição química com altos índices de ferrita em uma matriz austenítica (MORELO, 2014).

Segundo Gamarra (2017), o desenvolvimento dos aços inoxidáveis coincide com o período em que os metalurgistas alemães, franceses, ingleses e estadunidenses começavam a publicar estudos sobre as ligas de ferro com baixo teor de carbono e contendo cromo em sua estrutura.

Ainda segundo Gamarra (2017), os aços inoxidáveis podem ser divididos em cinco grupos distintos: a) ferríticos, b) austeníticos, c) martensíticos, d) endurecidos por precipitação e, e) ferríticos-austeníticos (duplex).

a) Ferríticos

Aços inoxidáveis ferríticos são ligas de ferro cromo com predominância de matriz ferrítica, independente da temperatura até a fusão. Possui baixo teor de carbono e a porcentagem de cromo está entre 12 e 30%. Em função da falta de austenita não podem ser endurecidos por têmpera. Esse aço possui boa resistência à corrosão e oxidação (MODENESI et al., 2012).

b) Austeníticos

São aços inoxidáveis constituídos por uma microestrutura cúbica de face centrada (CFC) com fase austenítica predominante. Quando comparado aos aços martensíticos ou ferríticos, apresenta maiores limites de resistência à corrosão. Por ser composto por ferro, cromo e níquel, esse material é ideal para trabalhos a frio possuindo boa soldabilidade e

ótimas propriedades mecânicas. Em função de sua resistência à oxidação, é muito usado como elemento de arquitetura e nas indústrias alimentícia e farmacêutica (PICKERING, 1976).

c) Martensíticos

De acordo com Silva e Mei (1988), os aços inoxidáveis martensíticos são ligas de ferro cromo com teor de cromo oscilando entre 11 e 18% e carbono acima de 0,1%. O percentual de carbono favorece, durante a transformação de fase, a mudança de ferrita para austenita em altas temperaturas e quando resfriado, se transforme em martensita, que possui característica de maior dureza.

d) Endurecidos por precipitação

Segundo (ARISOY *et al.*, 2003), os aços endurecidos por precipitação tiveram seu desenvolvimento na década dos anos 1940 tendo tomado importância crescente em diversas aplicações em função das suas propriedades especiais. Em condições apropriadas é possível fabricar compostos intermediários capazes de causar o endurecimento por precipitação nos aços inoxidáveis. Os precipitados envolvem elementos de liga como molibdênio, níquel, titânio e alumínio. Depois de produzido, é realizado tratamento térmico de endurecimento por envelhecimento onde esses elementos se precipitam na forma de compostos metálicos duros, aumentando de forma considerável a dureza e resistência mecânica (DAVIS, 1994).

e) Ferríticos-austeníticos (duplex)

Os aços inoxidáveis ferríticos austeníticos (duplex) possuem maior teor cromo e menor teor de níquel quando comparado aos aços austeníticos. O molibdênio (Mo) apresenta-se como elemento de liga adicional em alguns casos, desde que a quantidade de níquel (Ni) seja insuficiente para formar uma estrutura totalmente austenítica, a estrutura dos duplex será mista: ferrítica-austenítica. Suas propriedades misturam características dos aços ferríticos e austeníticos. Esse tipo de aço inoxidável apresenta alta resistência à fadiga e alta resistência ao ataque por íons de cloretos (BAERE *et al.*, 2017).

De acordo com a composição química, os aços inoxidáveis duplex são divididos em três grupos distintos (SENATORE *et al.*, 2007):

- Aços inoxidáveis duplex de baixa liga: possuem menor teor de elementos de liga e não possuem molibdênio na composição química. Pode-se citar como aço inox duplex de baixa liga, o UNS S32304;
- Aços inoxidáveis duplex de média liga: são os duplex mais utilizados, apresentam resistência à corrosão intermediária entre os austeníticos comuns e os aços inoxidáveis superausteníticos com 5 e 6% de molibdênio. Um exemplo de aço duplex de média liga é o UNS S32205;

- Aços inoxidáveis duplex de alta liga: são comumente chamados de superduplex. Apresentam elevada resistência à corrosão comparável aos superausteníticos que possuem entre 5 e 6% de molibdênio. O UNS S32750 é um duplex de alta liga bastante utilizado na indústria.

Os DSS's são materiais são denominados duplex em função da apresentação de ferrita e austenita em proporções de microestrutura equilibrada (BERGUIGA e BOUMERZOU, 2019). A ferrita proporciona características de ductilidade, tenacidade e soldabilidade, ao passo que a austenita proporciona alta resistência à corrosão sob tensão (MAVI, 2020).

De forma padronizada, a composição química do aço inoxidável duplex é composta de 22% Cr, 5% Ni e 3% Mo com pequena porcentagem de N. Para melhor estabilização do balanço estrutural e melhorias da qualidade à corrosão por pites, são adicionadas porcentagens de Silício, Tungstênio e Cobre (IMOA, 2012; Rockwell International *et al.*, 1992)

A adição de nitrogênio (N) na estrutura do aço inoxidável duplex justifica o comportamento bifásico do material onde a austenita foi aumentada para quase 50%, contribuindo para melhoria de sua tenacidade e das propriedades contra corrosão a cloretos (DIRVIYAM *et al.*, 2015).

Segundo Koyee *et al.* (2014), a combinação entre os elevados valores de alongamento proporcionados pela austenita em conjunto com os elevados limites de escoamento da ferrita fizeram com que o aço inoxidável duplex se tornasse superior em aplicações específicas se comparado ao aço inoxidável convencional.

O aço inoxidável para ser classificado como duplex deve ter valor de resistência à corrosão por pites (*Pitting Resistance Equivalent Number* – PREN) superior a 20, sendo este, o primeiro indicador usado para medida da resistência à corrosão (BATISTA *et al.*, 2014).

Segundo IMOA (2012), a família duplex pode ser classificada em cinco ramificações, sendo elas: hiper duplex (PRE = 49-53), super duplex (PRE = 38-43), standard duplex (PRE = 34- 38), *lean duplex* com Mo (PRE = 27-34), *lean duplex* (PRE = 21-27).

De acordo com Silva e Mei (1988), a tenacidade dos aços inoxidáveis duplex está classificada entre os aços inoxidáveis austeníticos e dos aços inoxidáveis ferríticos.

Os aços inoxidáveis duplex possuem limite de escoamento entre 550 e 690 Mpa e conforme a necessidade do usuário ou aplicação, é possível aumentar a resistência à corrosão e por pites com adição de Mo em sua composição (DAVIS, 1994).

Os aços inoxidáveis duplex possuem larga aplicação, desde peças e componentes de máquinas até estruturas mais complexas, entretanto torna-se necessário sua passagem por algum processo de fabricação, como, por exemplo, a usinagem.

Peruchi *et al.* (2020) destacam que o fresamento de topo é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria metalmeccânica.

De acordo com Diniz *et al.* (2014), a usinabilidade pode ser definida como o grau de dificuldade para se usinar determinado material. Existe uma relação entre os elementos de liga dos aços inoxidáveis duplex e seu grau de dificuldade da usinagem. Quanto maior o teor de elementos de liga, maior será a dificuldade em usinar, causando desgaste de forma intensa das ferramentas, reduzindo também o grau de qualidade do acabamento superficial (AGGEN *et al.*, 1990).

2.2. PRINCÍPIO DA OPERAÇÃO DE FRESAMENTO

Os processos de fabricação têm se desenvolvido ao longo dos anos a partir do desenvolvimento de novas tecnologias e de novos materiais. Tais processos podem ser classificados em dois tipos: aqueles onde há remoção de cavaco (parte de material retirado) denominados processos de usinagem e aqueles onde não há remoção de material como, por exemplo, a fundição, soldagem, forjamento e estampagem (MACHADO *et al.*, 2009).

Dentre todos os processos de fabricação, a usinagem ocupa lugar de destaque (DINIZ *et al.*, 2014).

Segundo Gouarir *et al.* (2018), usinagem é definida como um processo de fabricação no qual a matéria-prima é transformada através de remoção de material sob a forma de cavaco, sendo uma técnica fundamental para a indústria de fabricação de peças.

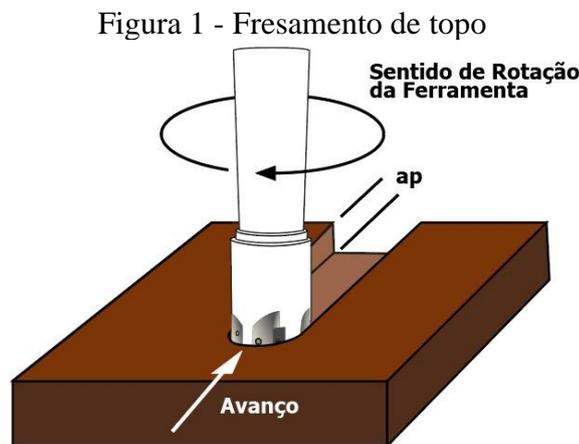
O fresamento é um dos processos de usinagem que tem grande aplicação nas indústrias em função da elevada taxa de remoção de material, boa precisão dimensional e geométrica, podendo ser utilizado na fabricação de superfícies planas e não planas (DINIZ *et al.*, 2014). É um processo com aplicações nas indústrias metalmeccânica, aeroespacial, automotiva, e nos setores de energia e alimentício.

Ferraresi (1969) define o fresamento como um processo mecânico de usinagem que realiza a obtenção de variadas superfícies com o auxílio de ferramentas muticortantes.

A principal característica do fresamento é a remoção de material com uma ferramenta denominada fresa, segundo Diniz *et al.* (2014). Essa ferramenta possui arestas cortantes distribuídas simetricamente ao redor de seu eixo. Seu movimento de corte é proporcionado

pela rotação da ferramenta ao redor do seu eixo. O movimento de avanço é feito pela própria peça em usinagem, fixada na mesa da máquina, o qual obriga a peça a passar sob a ferramenta em rotação, que lhe dá forma e dimensão desejadas.

De acordo com Black e Kohser (2008), as operações de fresamento são classificadas em periférico ou tangencial, faceamento e topo. O fresamento de topo é um dos processos mais utilizados na indústria, produzindo formas geométricas complexas, alta taxas de remoção de material e produção de formas com boa precisão dimensional. Por estas razões, este processo é bastante empregado nas indústrias metalmecânica (BHISE e JOGI, 2021; OLIVEIRA *et al.*, 2020). A Figura 1 demonstra os movimentos do processo de o fresamento de topo.

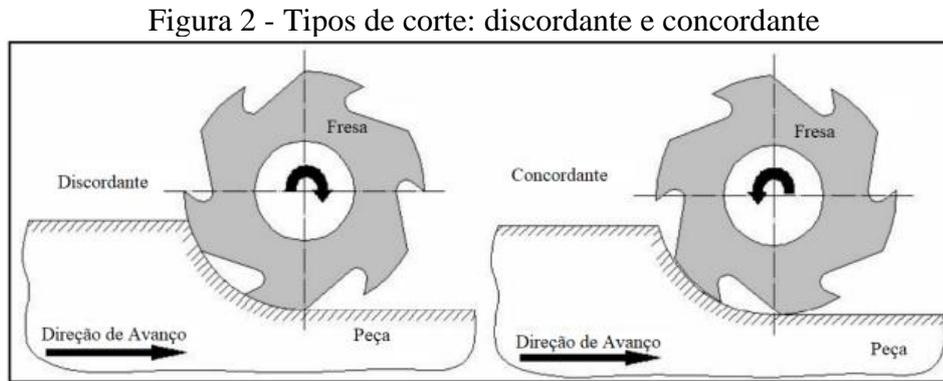


Fonte: adaptado de Hayajneh *et al.* (2007)

O processo de fresamento possui dois tipos de corte, concordante e discordante. No fresamento discordante, o avanço da mesa conduz a peça no sentido contrário ao movimento do giro dos dentes da fresa de forma que a espessura de corte aumenta partindo do zero até a espessura máxima possível, o que gera forte atrito entre a peça e a ferramenta levando à deformação plástica na área de corte. Xu e Wang (2022) estudaram os efeitos da velocidade do fuso, taxa de avanço e profundidade de corte na força de fresamento e rugosidade da superfície durante o fresamento discordante. Concluíram que a área de fresagem equivalente afeta tanto a força de fresagem quanto a rugosidade da superfície. Quanto maior a área de fresagem equivalente, maior a força de fresagem e pior a qualidade da superfície. Pelo contrário, quando a área de fresagem equivalente diminui, a força de corte correspondente diminui e a qualidade da superfície é melhor.

Já no fresamento concordante tal situação é minimizada uma vez que a componente da força de usinagem tem o mesmo sentido forçando a peça contra a mesa da máquina-

ferramenta (DINIZ *et al.*, 2014). Lyu *et al.* (2023) analisaram a topografia de superfície usinada do material Inconel 718. Os autores concluíram que parâmetros diferentes de corte levam a diferenças nas trajetórias da aresta de corte entre a ferramenta e o corpo de provas. A Figura 2 apresenta os tipos de corte do fresamento.



Fonte: Sorte (2020)

2.3. ESCOLHA DA FRESA PARA OPERAÇÕES DE SUPERFÍCIE PLANA

De acordo com Diniz *et al.* (2014), a escolha de uma fresa de topo envolve as definições a seguir, as quais serão detalhadas nas seções subsequentes:

- Diâmetro da fresa;
- Número de dentes da fresa; e
- Material da pastilha.

2.3.1. Diâmetro da fresa

Na definição do diâmetro da fresa (D_c), um dos principais quesitos a serem observados é a largura da superfície fresada ou penetração de trabalho (a_e). Se a largura usinada for menor ou igual ao diâmetro da fresa, os valores de espessura de corte (h) serão pequenos, ocorrendo tanto na entrada quanto na saída do dente da fresa, gerando maior pressão de corte e vibrações no sistema, Figura 3A.

Caso o diâmetro da fresa possua grande discrepância quando comparado com a largura fresada, poderá ocorrer lascamento ou quebra da pastilha em função do choque do dente da ferramenta com o material que está sendo trabalhado, conforme Figura 3B (SANDVIK COROMANT, 2023).

Figura 3 - Posicionamento da aresta de corte



Fonte: SANDVIK COROMANT (2023)

Recomenda-se que o diâmetro da fresa seja 30% maior que a penetração de trabalho (a_e), conforme Equação 1 (DINIZ *et al.*, 2014).

$$D_c = 1,3 \times a_e \quad (1)$$

2.3.2. Número de dentes

A escolha do número de dentes de uma fresa deve levar em consideração a especificação do material a ser usinado. Materiais que produzem cavacos em fitas, por exemplo, necessitam de mais espaço entre os inserts, devendo ser usinados com fresas de passo largo (poucos dentes). As presas de passo fino (número grande dentes) têm sua primeira aplicação voltada ao acabamento de materiais que produzem cavacos longos. As fresas de passo médio (número intermediário de dentes) devem ser usadas no desbaste médio de materiais que forma cavacos longos ou no desbaste pesado de ferro fundido, por exemplo, uma vez que na usinagem desse material não há problemas com armazenamento de cavacos (DINIZ *et al.*, 2014).

Em um processo de usinagem utilizando um torno, o que se ajusta na máquina é o avanço. Em uma fresadora, o ajuste é feito na velocidade de avanço, ou seja, a velocidade da mesa fresadora. Dessa forma, uma alteração do número de dentes da fresa ocasionará alteração no avanço por dente (f_z), exceto em situações em que a velocidade de avanço da mesa (v_f) for alterada proporcionalmente, conforme Equação 2 (DINIZ *et al.*, 2014):

$$v_f = f_z \times z_n \times n \quad (2)$$

Onde:

z_n = número de dentes da fresa

n = rotação da fresa (rpm)

A redução do número de dentes da fresa sem alteração das condições de corte, ocasionará aumento do avanço por dente e aumento da espessura de corte média (h_m). Dessa forma, há considerável diminuição da força específica de corte (k_c) e da potência de corte (P_c), conforme Equações 3 e 4 (DINIZ *et al.*, 2014). Portanto, fresas de passo largo (poucos dentes) exigem potência de corte menor que fresas de passo fino (muitos dentes), considerando as mesmas condições de corte (ASLAN *et al.*, 2020).

$$k_c = k_{c1} h_m^{-m_c} \quad (3)$$

$$P_c = \frac{a_p a_e v_f k_c}{60 \times 10^6 \eta} \quad (4)$$

Onde:

k_c = força específica de corte (N/mm²)

k_{c1} = força específica de corte em 1 mm² (N/mm²)

h_m = espessura de corte média (mm)

$-m_c$ = coeficiente angular

P_c = potência de corte (kW)

a_p = profundidade de usinagem (mm)

η = rendimento da máquina (%)

O fresamento de topo dos aços inoxidáveis duplex é de extrema relevância para as indústrias de petróleo e gás, bem como para outros setores que fazem uso desse material em componentes mecânicos. Nesse contexto, estudos detalhados têm sido conduzidos para aprimorar o processo e, conseqüentemente, a qualidade das peças usinadas.

Um exemplo relevante desse esforço é o estudo de Bouzid *et al.* (2004), que investigou a interferência da velocidade de corte, do avanço e da profundidade de corte na rugosidade de superfície R_a durante o processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex. Suas conclusões apontaram que a utilização de altas velocidades de corte em conjunto

com baixos avanços contribui significativamente para a melhoria da qualidade da rugosidade das peças usinadas. Essas descobertas, portanto, fornecem insights valiosos para a otimização do fresamento de aços inoxidáveis duplex em aplicações industriais críticas, atendendo à necessidade de melhorar a qualidade das peças nesse importante contexto industrial.

Zhang *et al.* (2007) aplicaram otimização no processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex. O trabalho analisou a influência das variáveis avanço por dente, da velocidade de corte, da profundidade de corte, da temperatura superficial e do desgaste de flanco na rugosidade R_a . Os resultados mostraram que houve maior influência por parte da velocidade de corte e avanço por dente. Concluíram também que o desgaste de flanco da ferramenta foi estatisticamente significativo contribuindo assim para o aumento da rugosidade.

Figueiredo e Bordinassi (2009) analisaram a influência das variáveis controláveis velocidade de corte, avanço por dente e vazão de fluido na rugosidade de superfície R_a no fresamento de topo do aço inoxidável super duplex ASTM A-890. Os pesquisadores concluíram que uma menor taxa de avanço combinada com a utilização do sistema MQCL proporcionaram valores menores de rugosidade além de desgaste menor da ferramenta de corte.

Dirviyam *et al.* (2015) estudaram a influência de variáveis de controle do processo de fresamento nas respostas rugosidade de superfície, força de corte e desgaste de flanco. Verificaram que existe influência significativa das variáveis de controle sobre as respostas em análise.

Gouveia *et al.* (2016) realizaram trabalho que estudou o processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex com o objetivo de analisar o desempenho da usinagem utilizando diferentes tipos de fresa de topo. Chegaram à conclusão de que as fresas com quatro arestas cortantes proporcionam menores valores de rugosidades R_a , R_z e R_{max} .

Os pesquisadores Uhlmann *et al.* (2017) analisaram a influência das variáveis do processo no fresamento de topo do aço inoxidável duplex utilizando fresa com insertos intercambiáveis e refrigeração interna. Observaram aumentos da produtividade e da vida útil da ferramenta.

Airao *et al.* (2018) realizaram estudo sobre o processo de fresamento de topo do aço inoxidável super duplex 2507 a fim de analisar a influência das variáveis do processo e da vazão do fluido de corte na rugosidade R_a . Os pesquisadores chegaram à conclusão de que o avanço por dente foi a variável que exerceu maior influência sobre a rugosidade. Verificaram também que a utilização de fluido de corte proporciona melhor acabamento superficial.

Policena *et al.* (2018) realizaram uma análise da influência das variáveis de controle do processo sobre as rugosidades R_a e R_z no fresamento de topo de acabamento do aço inoxidável duplex UNS S32205, chegando à conclusão de que a variável que exerceu maior influência sobre as respostas foi o avanço por dente.

George *et al.* (2022) analisaram a influência dos parâmetros de corte na usinabilidade dos aços inoxidáveis duplex UNS S32205 e super duplex UNS S32507 durante o fresamento. Os pesquisadores concluíram que a profundidade de corte exerce mais efeito na força de corte do que a velocidade do fuso e a taxa de avanço. A rugosidade da superfície foi mais influenciada pela taxa de avanço do que pela velocidade do fuso e menos influenciada pela profundidade de corte para ambos os materiais. Os resultados também mostraram que a temperatura de corte é influenciada principalmente pela velocidade do fuso.

2.4. MATERIAIS PARA FERRAMENTAS

De forma geral, os materiais de ferramentas da classe ISO P são utilizados para a usinagem de todos os tipos de aço, exceto aço inoxidável com estrutura austenítica; os materiais da classe ISO M são indicados para usinagem de aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos; a classe K é direcionada aos ferros fundidos; materiais da classe ISO N são utilizados para corte de ligas de alumínio e materiais não ferrosos; materiais de classe ISO S são utilizados em ligas especiais resistentes ao calor; e os materiais das classe ISO H são indicados para usinagem de materiais endurecidos (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2004; DINIZ *et al.*, 2014).

Os materiais das ferramentas são classificados também em várias subclasses e quanto maior o número que a representa, maior é sua tenacidade, ou seja, maior resistente a choques, e menos resistente ao desgaste é a pastilha. Dessa forma, durante a realização de um processo de usinagem em acabamento, sem casca endurecida de fundição ou forjamento e o sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação-peça rígido em uma superfície ininterrupta, a pastilha não necessita de muita tenacidade, mas de resistência ao desgaste, devendo ser utilizada uma subclasse de número baixo, menor ou igual a 15 (DINIZ *et al.*, 2014).

Durante a realização de um processo em desbaste pesado, peça bruta, com camada endurecida e sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação-peça de baixa rigidez em uma superfície que apresenta interrupções, deve ser utilizada classe de número alto, acima de 35. Em processos que apresentem condições intermediárias, as pastilhas de subclasse intermediária devem ser utilizadas (DINIZ *et al.*, 2014; MACHADO *et al.*, 2009).

Xu e Wang (2022) estudaram os efeitos do uso de ferramentas com revestimento PVD e CVD. Concluíram que a velocidade do fuso tem a maior influência na força de corte das duas ferramentas e tem maior influência na rugosidade da superfície das ferramentas usinadas com revestimento PVD. A taxa de avanço é o fator mais significativo que afeta a superfície usinada por ferramentas com revestimento CVD.

2.4.1. Materiais para fresa

De acordo com Diniz *et al.* (2014), para selecionar o material da ferramenta de corte, vários fatores devem ser analisados, dentre eles:

- Material a ser usinado;
- Processo de usinagem;
- Condição da máquina operatriz;
- Forma e dimensões da ferramenta;
- Custo do material da ferramenta;
- Condições de usinagem;
- Condições da operação.

Ainda segundo Diniz *et al.* (2014), não há uma classificação geral de materiais para ferramentas, entretanto podem ser agrupados da seguinte forma:

- Aços rápidos;
- Aços rápidos com cobertura;
- Metal duro;
- Metal duro com cobertura;
- Material cerâmico;
- Nitreto de boro cúbico;
- Diamante.

Brito (2012) relata que um material de ferramenta de corte para ser bem-sucedido deve ser:

- Duro: para que resista à deformação e desgastes;
- Tenaz: para resistir às quebras;
- Quimicamente estável: para resistir à oxidação e difusão; e,

- Resistente às alterações térmicas repentinas.

2.4.2. Metal duro revestido (HC)

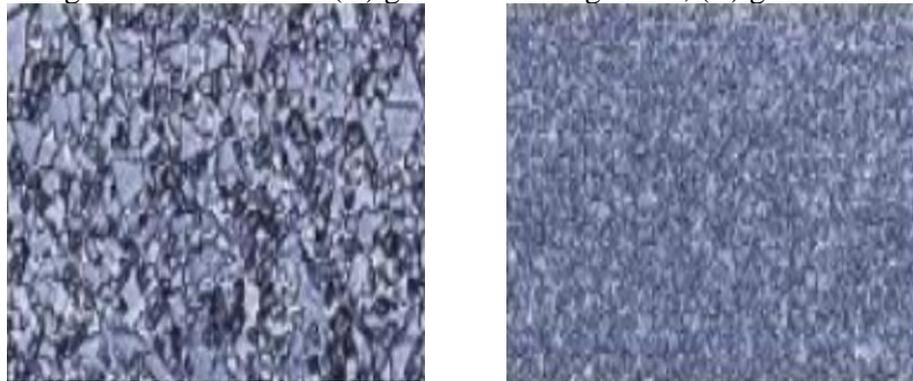
O metal duro é um produto sintetizado a partir da metalurgia do pó de carbeto de tungstênio, titânio e tântalo, tendo como aglomerante o cobalto. Sua dureza permite que a capacidade de corte se mantenha até a temperatura da ordem de 1000°C (DINIZ *et al.*, 2014; PARSI *et al.*, 2020).

Atualmente, aproximadamente 90% de todas as pastilhas para ferramenta de corte são de metal duro revestido. Sua exclusiva combinação de resistência ao desgaste e tenacidade, além de sua habilidade para conformidade com complexas geometrias contribuíram para seu sucesso como material da ferramenta (SANTOS e SALES, 2007). A ferramenta de metal duro revestido combina o substrato de metal duro com uma cobertura com fase cerâmica, formando uma classe personalizada para aplicações específicas em processos de usinagem. Os principais processos de deposição são:

- Cobertura CVD (Deposição Química a Vapor): a cobertura é gerada através de reações químicas com temperaturas da ordem de 1000°C (DINIZ *et al.*, 2014);
- Cobertura PVD (Deposição Física de Vapor): a cobertura é gerada através da conversão à fase vapor do material que será depositado sobre o substrato formando um filme fino (PLUMMER *et al.*, 2000).

Grãos finos de carbeto de tungstênio (WC) são usados para aresta de corte com cobertura PVD, contribuindo para o aumento da resistência da aresta de corte, Figura 4 – A e B. Eles também são beneficiados com uma resistência superior às cargas cíclicas térmicas e mecânicas. Suas aplicações típicas são brocas inteiriças de metal duro, fresas inteiriças de metal duro, pastilhas para corte e canais, fresamento e classes para acabamento (DINIZ *et al.*, 2014).

Figura 4 - Metal duro: (A) grãos médios a grossos; (B) grãos finos



A

B

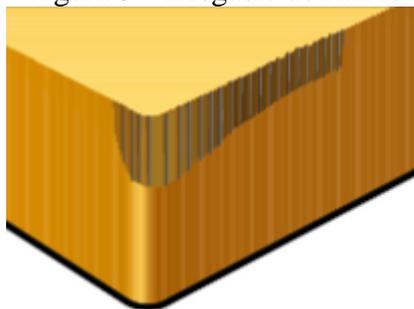
Fonte: SANDVIK COROMANT (2023)

2.5. DESGASTE DA FERRAMENTA

Diversos são os tipos de desgastes das ferramentas de corte, podendo ser citados, de acordo com (BRITO, 2012; DINIZ *et al.*, 2014; SANDVIK COROMANT, 2023):

Desgaste de flanco: ocorre na superfície de folga da ferramenta e é causado pelo contato entre a ferramenta e a peça, conforme Figura 5. É o tipo mais comum de desgaste. Ocasionalmente deteriora o acabamento superficial da peça podendo modificar totalmente a aresta de corte original fazendo com que a peça fique fora da faixa de tolerância.

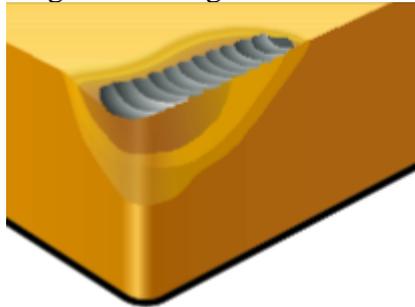
Figura 5 - Desgaste de flanco



Fonte: SANDVIK COROMANT (2023)

Desgaste de cratera: ocorre devido ao atrito durante o processo de usinagem. Essas crateras podem diminuir a área de corte e afetar a qualidade da peça usinada, conforme Figura 6. Estratégias como o uso de materiais mais resistentes, revestimentos protetores e fluidos de corte apropriados ajudam a minimizar o desgaste de crateras. A monitorização regular da ferramenta é importante para substituí-la quando necessário e garantir uma produção eficiente. O desgaste de cratera se forma na região com maior temperatura gerada na interface ferramenta-cavaco (TRENT e WRIGHT, 2000).

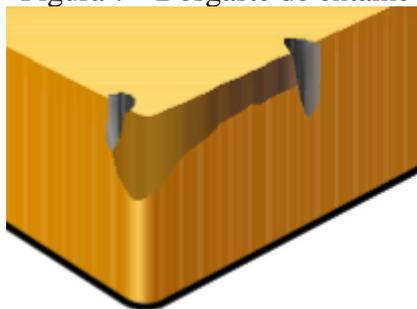
Figura 6 - Desgaste de cratera



Fonte: SANDVIK COROMANT (2023)

Desgaste de entalhe: ocorre nos dois extremos de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, ocasionando a deterioração do acabamento superficial da peça e modificando o formato da aresta de corte original, conforme Figura 7.

Figura 7 - Desgaste de entalhe



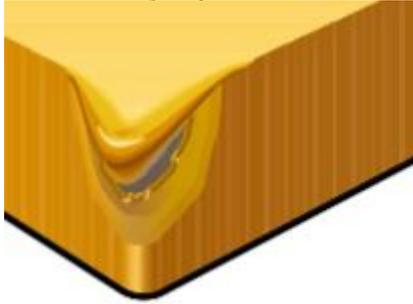
Fonte: SANDVIK COROMANT (2023)

2.5.1. Avarias das ferramentas

As principais avarias que podem ocorrer nas fresas são (DINIZ *et al.*, 2014; SANDVIK COROMANT, 2023):

Deformação plástica da aresta de corte: é um tipo de avaria geralmente causada em virtude do excesso de pressão aplicada à ferramenta, somada com a alta temperatura, gerando a deformação plástica, Figura 8.

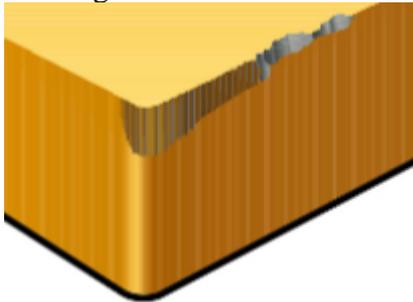
Figura 8 - Deformação plástica da aresta de corte



Fonte: SANDVIK COROMANT (2023)

Lascamento: é um tipo de avaria da ferramenta. Ao contrário do desgaste frontal e de cratera, que retiram partículas muito pequenas continuamente, no lascamento são retiradas partículas maiores subitamente. Ocorre principalmente em função da fragilidade do material da pastilha e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada, conforme Figura 9.

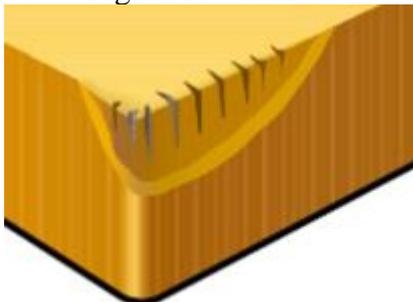
Figura 9 - Lascamento



Fonte: SANDVIK COROMANT (2023)

Trincas: são avarias causadas por variação brusca de temperatura ou esforços mecânicos, Figura 10. Trincas de origem térmica são perpendiculares à aresta de corte. Trincas de origem mecânica são paralelas à aresta. O crescimento da trinca leva à quebra da ferramenta.

Figura 10 - Trincas



Fonte: SANDVIK COROMANT (2023)

Quebras: podem ocorrer de forma inesperada devido a alguns fatores: ferramenta muito dura, carga excessiva sobre a ferramenta, raio de ponta, ângulo de ponta ou ângulo de cunha pequenos, corte interrompido, parada instantânea do movimento de corte, entupimento dos canais de expulsão dos cavacos ou dos bolsões de armazenamento dos cavacos, etc. A quebra da ferramenta pode ocasionar danos também ao porta-ferramentas e na própria peça.

2.5.2. Mecanismos de desgastes das ferramentas

Diversos são os mecanismos que causam desgaste das fresas durante o processo de usinagem, dentre eles destacam-se (DINIZ *et al.*, 2014):

- Aresta postiça de corte: durante a usinagem, pode ser formada na superfície entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, uma camada de cavaco que, fica aderido à aresta de corte, modificando seu comportamento com relação à força de corte, acabamento superficial da peça e desgaste da ferramenta, Figura 11.

Figura 11 - Aresta postiça de corte



Fonte: Diniz et al. (2014)

- Abrasão mecânica: trata-se de uma das principais causas de desgaste da ferramenta. Tem atuação mais concentrada no desgaste de flanco uma vez que a superfície de saída atrita com um elemento flexível que é o cavaco. Esse desgaste é ocasionado pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte, o que reduz a dureza da ferramenta;

- Aderência: sua formação se dá em função do contato de duas superfícies metálicas sob cargas moderadas, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte, formando entre elas um extrato metálico causador da aderência;
- Difusão: trata-se de fenômeno microscópico que é ativado pela temperatura na zona de corte. A difusão no estado sólido é caracterizada pela transferência de átomos de um metal para outro. Depende da temperatura, duração do contato, afinidade físico-química e intensidade do contato entre os metais envolvidos;
- Oxidação: é causado por altas temperaturas e presença de ar e água (contida nos fluidos de corte). O desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso do ar na região, sendo uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe.

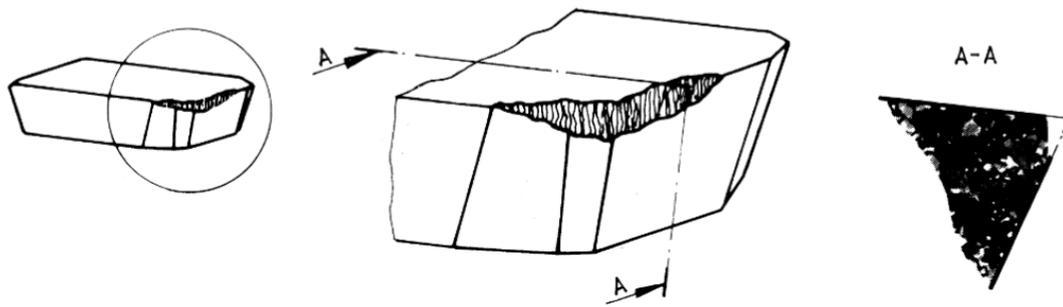
2.5.3. Medição do desgaste da ferramenta de corte

Há várias maneiras pelas quais se podem classificar os diversos tipos de deterioração que podem vir a ocorrer numa ferramenta de corte. Entretanto a ISO (*International Organization for Standardization*) normatiza esses eventos em três classes: desgaste, avarias e deformação plástica. As ferramentas destinadas à operação de torneamento seguem a norma ISO 3685 (INTERNATIONAL STANDARD, 1993), as ferramentas com insertos que são utilizadas no fresamento frontal ou faceamento, seguem a norma ISO 8688-1 (INTERNATIONAL STANDARD, 1989a) e as ferramentas utilizadas no fresamento de topo são regidas pela norma ISO 8688-2 (INTERNATIONAL STANDARD, 1989b).

Tais normas consideram vários critérios para quantificação da vida útil das ferramentas, tais como: desgaste de flanco, desgaste de superfície de saída, lascamento, trincas, deformação plástica e falha catastrófica.

No fresamento de topo utilizando ferramentas com insertos de metal duro, como é o caso deste trabalho, foram utilizados os parâmetros da ISO 8688-2 (INTERNATIONAL STANDARD, 1989b) relativos à avaliação do desgaste uniforme de flanco, que é definido como a “superfície desgastada que possui uma espessura normalmente constante e se estende ao longo da aresta da ferramenta, considerando-se a medição sobre a aresta a ativa”, tomando-se o plano ortogonal da ferramenta para medição, conforme Figura 12.

Figura 12 - Desgaste uniforme de flanco



Fonte: INTERNATIONAL STANDARD (1989a)

A escolha do desgaste uniforme de flanco, como parâmetro para os experimentos realizados, se deu em função da simplicidade de medição e por tratar-se de um parâmetro muito utilizado no estudo de vida das ferramentas.

Em um processo de usinagem, todos os mecanismos de desgaste podem ser observados e analisados, porém um deles irá sobressair sobre os demais (MACHADO *et al.*, 2009). Por ser uma atividade complexa, para uma correta análise do desgaste de ferramenta, é necessário observar o material da peça e o material da ferramenta, bem como as condições de corte.

2.6. INTEGRIDADE SUPERFICIAL

A rugosidade superficial é um fator de grande importância para obter o desempenho desejado da peça de trabalho. Em aplicações de engenharia, ela tem sido largamente utilizada para monitoramento de máquinas-ferramentas (WHITEHOUSE, 1997).

As características mais utilizadas nos processos de fabricação são a topografia, textura e acabamento da superfície. Segundo Grzesik (2016), a medição do perfil é necessária durante o processo de corte, estando relacionada à rugosidade da superfície.

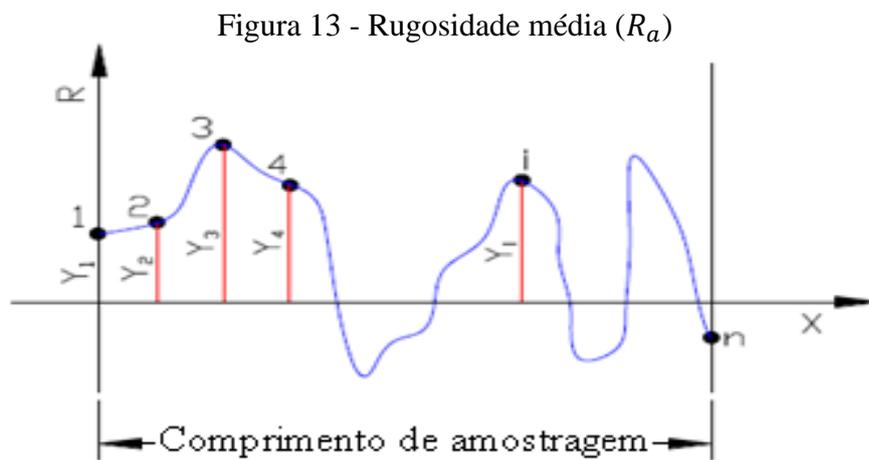
De acordo com Quinten (2019), a rugosidade pode ser medida em função da altura das irregularidades em relação a uma linha média e um perfil típico de rugosidade que inclui picos e vales.

A rugosidade é composta de irregularidades finas ou de erros micro geométricos resultantes da ação intrínseca ao processo de corte. Ela depende de vários parâmetros como máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta e operação de usinagem. Além disso, segundo Machado *et al.* (2009), a rugosidade é caracterizada por vários parâmetros como amplitude, de espaço e híbridos.

Os parâmetros de amplitude consideram as alturas dos picos, profundidades dos vales ou ambos. Já os parâmetros de espaço, são definidos pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície e os parâmetros híbridos se dão pela combinação dos parâmetros de amplitude e de espaço (MACHADO *et al.*, 2009).

Dentre os parâmetros de amplitude, o desvio aritmético médio, R_a , é o mais empregado, principalmente para controle de processo, tendo em vista que alterações no seu valor representam alterações no processo, especialmente no desgaste da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2009).

A rugosidade média R_a , conforme ABNT (2002), é definida em função da análise das médias aritméticas dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de medição (lm) em relação à linha média do perfil primário, Figura 13.



Fonte: Garcia *et al.* (2021)

Para Amorim (2002), rugosidade é um conjunto de imperfeições, com espaçamento regular ou irregular, que formam um padrão em superfícies. Presentes em todas as superfícies reais, resultam do método de obtenção utilizado (torneamento, fresamento, furação).

Os pesquisadores Suresh *et al.* (2019) analisaram o efeito dos parâmetros do processo na rugosidade da superfície e na geração de forças de corte na usinagem de material de aço inoxidável duplex (DSS 2205) com ferramenta de metal duro revestida com TiN. Os resultados obtidos indicaram que a força de corte aumenta com o aumento da taxa de avanço e profundidade de corte enquanto a força de corte diminuiu com o aumento da velocidade de corte. A rugosidade da superfície diminuiu com o aumento da velocidade de corte e baixa taxa de avanço.

George *et al.* (2022) analisaram parâmetros de corte, como taxa de avanço, velocidade do fuso e profundidade de corte, durante operação de fresamento CNC, a seco, dos aços

inoxidáveis duplex UNS S32205 e super duplex UNS S32507. Os resultados revelaram que a profundidade de corte tem mais efeito na força de corte do que a velocidade do fuso e a taxa de avanço. A rugosidade da superfície foi altamente influenciada pela taxa de avanço do que pela velocidade do fuso e menos influenciada pela profundidade de corte para ambos os materiais.

2.6.1. Sistemas de medição da rugosidade

O comprimento de amostragem (l_r) é definido pela ABNT (2002) como sendo o comprimento na direção do eixo x usado para identificar as irregularidades características do perfil sob avaliação. O comprimento de avaliação (l_n) é entendido como o comprimento na direção do eixo x , utilizado para estabelecimento do perfil sob avaliação, contendo um ou mais comprimentos de amostragem, segundo MACHADO et al. (2009), que recomenda ainda um comprimento de medição cinco vezes maior que o comprimento de amostragem para que se obtenha maior confiança dos dados em análise.

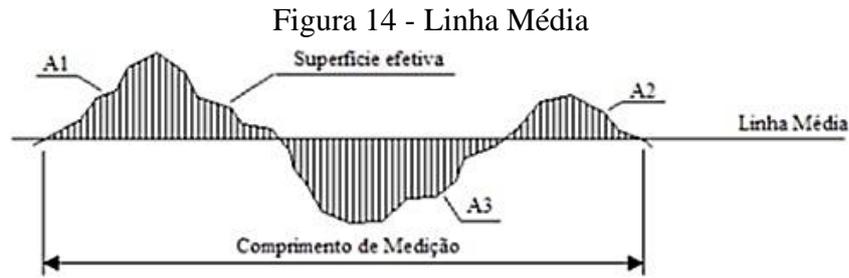
A Tabela 1 apresenta os comprimentos recomendados de amostragem para os perfis aperiódicos.

Tabela 1 - Comprimento da amostragem para perfis aperiódicos

Rugosidade R_a (μm)	Comprimento da amostragem l_r (mm)	Comprimento da medição l_m (mm)
Até 0,1	0,25	1,25
De 0,1 até 2,0	0,80	4,00
De 2,0 até 10,0	2,50	12,50
Acima de 10,0	8,00	40,00

Fonte: ABNT (1988)

Para as medições das rugosidades são utilizados dois sistemas de medidas, o “M” e o “E”. O primeiro, M, refere-se ao sistema de medição por linha média; esse é o sistema adotado no Brasil (ABNT, 1988; 2002), conforme Figura 14. O segundo, E, é referente à linha envolvente.



O processo de medição do sistema M é realizado a partir de uma linha paralela à direção do perfil dentro do percurso de medição, de modo que a soma das áreas superiores seja igual à soma das áreas inferiores, conforme Equação 5.

$$A1 + A2 = A3 \quad (5)$$

Scandiffio *et al.* (2016) avaliaram a influência da estratégia de corte sobre a rugosidade do aço ABNT D6 no fresamento de acabamento. De acordo com os pesquisadores, os menores valores de rugosidade foram obtidos no fresamento em cópia descendente, uma vez que, nesta condição, o centro da ponta da ferramenta estava em contato com a superfície usinada, proporcionando maior rigidez. Já no fresamento em cópia ascendente apresentou maiores valores de rugosidade porque, nesta condição, a ferramenta realiza o corte com o diâmetro efetivo máximo, favorecendo vibrações de baixa frequência que implicam no aumento da rugosidade.

Kull Neto (2016) avaliou a influência do desgaste de flanco da ferramenta e da estratégia de corte sobre a rugosidade do aço ABNT D6, no fresamento de acabamento. Segundo o autor, ambas as variáveis apresentaram influência estatisticamente significativa sobre a rugosidade.

Brito *et al.* (2016) avaliaram a influência dos parâmetros velocidade de corte, avanço por dente, profundidade corte e penetração de trabalho no fresamento de topo do aço ABNT 1045 na rugosidade utilizando a fresa de metal duro. Os resultados mostraram que o avanço por dente foi o fator que mais influencia os resultados de rugosidade.

Narooei e Ramli (2022) buscaram a seleção ideal de parâmetros de corte para rugosidade da superfície na usinagem de fresamento de AA6061-T6. Os pesquisadores concluíram que o raio da ponta tem efeito mais significativo na rugosidade da superfície seguido pelo ângulo de saída radial. O efeito da profundidade de corte na rugosidade da superfície é mais dominante do que a velocidade de corte.

Đurović *et al.* (2022) publicaram trabalho sobre a modelagem e previsão de rugosidade superficial no processo de fresamento de topo usando análise de regressão múltipla e rede neural artificial. Nesse trabalho, parâmetros de usinagem como velocidade do fuso, taxa de avanço e profundidade de corte foram usados no processo de fresamento de topo para minimizar a rugosidade da superfície.

Stanojković e Radovanović (2022) estudaram a influência dos parâmetros de corte, momento e rugosidade da superfície no fresamento de topo do alumínio 6082-T6. Concluíram que aumentando a profundidade de corte e a taxa de avanço, a força de corte principal e o momento também aumentam, enquanto o aumento da velocidade do fuso os reduz. Por outro lado, a taxa de avanço tem maior influência na rugosidade da superfície. Ao aumentar a taxa de avanço, a rugosidade da superfície também aumenta, enquanto o aumento da velocidade e profundidade de corte causam diminuição da rugosidade da superfície, ou seja, obtém-se uma melhor qualidade de processamento.

Assim, pode ser visto que vários trabalhos consideram as variáveis de controle velocidade de corte, avanço por dente, profundidade de corte e largura fresa como importante parâmetros no processo de fresamento.

2.6.2. Parâmetro de rugosidade (R_a)

O valor da rugosidade R_a é resultante da média aritmética das ordenadas $y_1, y_2, y_3 \dots, y_n$, considerando seus valores em módulo, a partir da linha de referência, conforme Equação 6 (PATIL, 2018).

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i|}{n} \quad (6)$$

A rugosidade de superfície R_a pode ser correlacionada com algumas propriedades funcionais de uma superfície que está sendo usinada, tais como rigidez de contato, resistência à fadiga, condutividade térmica, atrito e desgaste, lubrificação, fadiga por corrosão e tolerâncias admitidas (DAVIM, 2012).

Diversas normas técnicas tratam do parâmetro rugosidade de superfície como a NBR ISO 4287, a qual define que a rugosidade desempenha papel importante no comportamento dos componentes mecânicos uma vez que interfere substancialmente na qualidade de deslizamento, resistência da superfície relacionada ao escoamento de fluidos, resistência à

corrosão e fadigas. As normas ISO 2632 (INTERNATIONAL STANDARD, 1975) e DIN EN ISO 4766 (MASHKOMPLEKT, 2011) definem valores e critérios, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de rugosidade

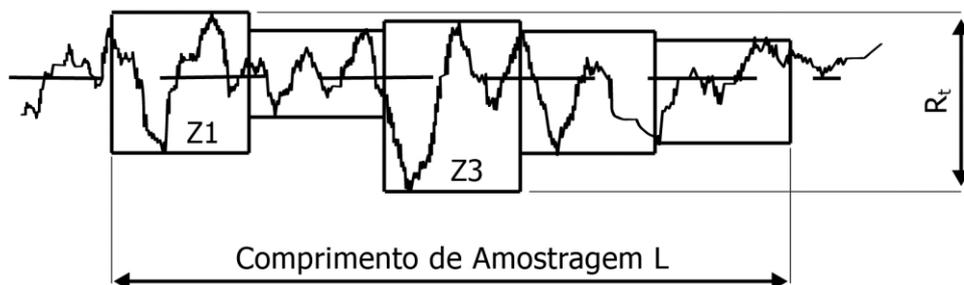
Processo de usinagem	Valores médios de Ra (μm)											
	0,025	0,05	0,10	0,20	0,40	0,80	1,60	3,20	6,30	12,50	25,00	
Esmerilhamento												
Torneamento e mandrilhamento												
Fresamento												
Modelagem e aplainamento												

Fonte: Adaptado de Diniz *et al.* (2014) e International Standard (1975)

2.6.3. Parâmetro de rugosidade (R_t)

A rugosidade R_t corresponde à distância vertical entre o pico mais elevado e o vale mais profundo dentro do comprimento de avaliação (L), sem levar em consideração os valores de rugosidade parcial (Z_1), segundo MACHADO *et al.* (2009), conforme Figura 15. Pode ser observado na figura que o pico mais alto é apresentado como Z_1 e o vale mais profundo como Z_3 , configurando a rugosidade total R_t (QUINTEN, 2019).

Figura 15 - Rugosidade R_t



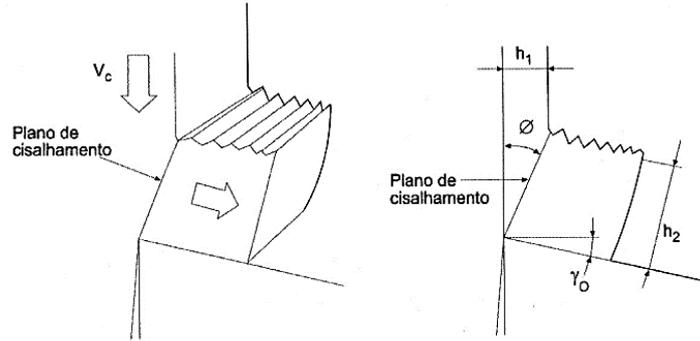
Fonte: RODRIGUES *et al.* (2020)

2.6.4. Mecanismo de formação do cavaco

Nos processos de usinagem, a formação do cavaco influencia diversos fatores ligados à usinagem como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado durante a usinagem, a penetração do fluido, dentre outros (DINIZ *et al.*, 2014).

Diniz *et al.* (2014) relata ainda que a formação do cavaco é um processo cíclico e periódico que envolve o cisalhamento centrado ao longo de uma região denominada plano de cisalhamento, conforme Figura 16.

Figura 16 - Diagrama esquemático da formação do cavaco



Fonte: Diniz *et al.* (2014)

O ângulo de cisalhamento (ϕ) é o plano de cisalhamento e a direção do corte. Quanto menor o ângulo de saída (γ_0), maior será a variação da direção do fluxo do cavaco, maior sua deformação e menor o ângulo de cisalhamento. Por consequência, maior será a razão h_2 (espessura do cavaco depois de formado/ h_1), espessura do cavaco antes de ser formado, que é denominada grau de recalque. Durante a usinagem de materiais dúcteis, essa influência ao ângulo de saída na deformação do cavaco e no grau de recalque é marcante, em função de sua suscetibilidade à deformação.

2.7. FLUIDO DE CORTE

A formação do cavaco gera uma grande quantidade de energia em função do atrito gerado pelo conjunto ferramenta-peça-cavaco (LISBOA *et al.*, 2013). Para redução desse calor são utilizados os chamados fluidos de corte. Para Trent e Wright (2000) os fluidos de corte são usados quando se desejar refrigerar a região de corte, especialmente em altas velocidades de corte; lubrificar a região de corte, principalmente em baixas velocidades e altas tensões de corte; reduzir a força de corte; melhorar o acabamento superficial e a precisão dimensional da peça. Além disso, eles ainda auxiliam na quebra e transporte do cavaco, protegem a superfície usinada e a máquina-ferramenta contra oxidação.

Segundo Machado *et al.* (2009), o fluido de corte auxilia no controle da temperatura na zona de cisalhamento, evitando que a ferramenta de corte atinja elevada temperatura,

contribuindo dessa forma para diminuição do atrito nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça.

Especialmente no processo de usinagem de aços inoxidáveis, a utilização de fluido de corte torna-se ainda mais importante devido às elevadas temperaturas. Em função dessa especificidade, das legislações ambientais e exigências do mercado consumidor, os fabricantes de fluido de corte investem em pesquisa e desenvolvimento de novos produtos.

2.7.1. Fluido de corte nos processos de usinagem

Os fluidos de corte são requisitos essenciais no setor de manufatura moderno. Durante o processo de usinagem, ocorre o cisalhamento do metal, resultando na formação de cavacos e quase 99% da energia mecânica externa é convertida em calor. O calor é gerado a partir da zona primária, zona secundária e zona terciária ou área de contato ferramenta-cavaco. Essa alta temperatura se distribui sobre a ferramenta de corte e causa efeitos prejudiciais, como deformação dimensional da peça de trabalho, perda de dureza a quente da ferramenta, maior taxa de desgaste da ferramenta levando à falha prematura da ferramenta e perda da integridade da superfície. Os fluidos de corte controlam o aumento da temperatura fornecendo resfriamento e lubrificação adequados entre a ferramenta e a peça de trabalho (KATNA *et al.*, 2020).

Além disso, os fluidos de corte também ajudam a prolongar a vida útil da ferramenta, reduzindo as vibrações ao fornecer efeito de amortecimento, produzindo cavacos curtos e gerenciáveis durante a usinagem. A ausência de fluidos de corte causa aumento do consumo de energia, desgaste rápido da ferramenta, e acabamento superficial insatisfatório (KATNA *et al.*, 2020).

2.7.2. Funções dos fluidos de corte

De acordo com Santos e Sales (2007), os fluidos de corte desempenham uma dada função na operação de usinagem, podendo essa função ser classificada como específica ou geral. A função específica se apresenta na necessidade de refrigerar ou lubrificar o processo de usinagem. A função geral se baseia na redução dos impactos ambientais, redução de custos e minimização dos problemas causados à saúde dos operadores.

O benefício da utilização do fluido de corte durante altas temperaturas é a refrigeração dos componentes envolvidos. Sua utilização contribui também para a remoção dos cavacos da

zona de corte além de proteger a ferramenta de corte e peça usinada contra a oxidação. Outro benefício da utilização de fluido de corte é a lubrificação do processo de usinagem (DINIZ *et al.*, 2014) quando o mesmo ocorre com baixa velocidade uma vez que pode ocorrer a formação de aresta postiça de corte (APC). Esse fenômeno ocorre quando o cavaco gerado adere à superfície de saída da ferramenta, encruando em seguida e permanecendo aderida por um tempo.

2.7.3. Os fluidos de corte como refrigerante

Segundo Diniz *et al.* (2014) e Machado *et al.* (2009), os fluidos de corte devem atender requisitos que proporcionem a redução do calor gerado na região de corte entre a peça e a ferramenta, que são:

- Baixa viscosidade de forma a proporcionar fluidez;
- Capacidade de umedecer o metal estabelecendo um bom contato térmico;
- Elevado calor específico e alta condutividade térmica.

Esses requisitos são esperados de um fluido de corte típico de ação refrigerante uma vez que tal ação ocorre pela minimização do calor do conjunto peça/ferramenta após ser gerado durante a usinagem (DINIZ *et al.*, 2014).

2.7.4. Os fluidos de corte como lubrificante

A lubrificação permite que o coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta e ferramenta e peça seja reduzido, facilitando o fluxo do cavaco, reduzindo a força e potência de corte e, conseqüentemente, a temperatura (DINIZ *et al.*, 2014; MACHADO *et al.*, 2009).

Para que a ação lubrificante aconteça é necessário que o fluido penetre nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, o que só é possível por meio do fenômeno capilaridade. Caso o fluido não atinja a região de corte, a ação refrigerante não surtirá efeito (DINIZ *et al.*, 2014).

Em processos em que o corte é interrompido, como o fresamento, a lubrificação é facilitada uma vez que o fluido com características lubrificantes toca a ferramenta enquanto esta encontra-se fora da peça, sendo levado para as interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça pela própria ferramenta (DINIZ *et al.*, 2014).

Para que um fluido seja um bom lubrificante, é necessário que ele tenha as seguintes características:

- Resistência a pressões e temperaturas elevadas sem vaporizar;
- Boas propriedades antifricção e antisoldantes;
- Viscosidade adequada.

Outras propriedades também são exigidas de um fluido de corte, independentemente da ação que esteja sendo desenvolvida no processo:

- Não apresentar odores desagradáveis;
- Não corroer (capacidade de proteger as máquinas ferramenta);
- Não originar precipitados sólidos que se depositem nas guias das máquinas;
- Não causar prejuízos à saúde dos trabalhadores.

2.7.5. Classificação dos fluidos de corte

Existem diversas formas de classificar os fluidos de corte sem que haja uma padronização que estabeleça classificação única entre os fabricantes. Uma primeira classificação agrupa os fluidos da seguinte forma (DINIZ *et al.*, 2014; KATNA *et al.*, 2020; MACHADO *et al.*, 2009):

- Fluidos gasosos: ar;
- Fluidos miscíveis em água: emulsões e soluções;
- Fluidos integrais: óleos minerais ou vegetais puros.

Outra classificação divide os fluidos de corte em dois grupos (DINIZ *et al.*, 2014; MACHADO *et al.*, 2009):

- Fluidos constituídos apenas por óleo integral;
- Fluidos formados a partir da adição de óleo concentrado em água;
- Emulsões;
- Soluções.

2.7.6. Óleos integrais

Óleos integrais são óleos de petróleo ou minerais sem água. Eles também são chamados de óleos puros e são usados como estão ou “diretos” sem adição de água ou diluição. Estes são formulados a partir de óleos minerais ou vegetais, misturando-os com diferentes aditivos como melhoradores de desempenho e encontram aplicação onde é necessária mais lubrificação do que resfriamento. Entre os outros tipos de fluidos de corte, estes fornecem o maior efeito de amortecimento. No entanto, eles têm desvantagens como baixa estabilidade térmica e capacidade de transferência de calor, alta inflamabilidade, alto custo e baixa eficiência em altas velocidades de corte. Aditivos são adicionados para melhorar a eficiência da usinagem em cargas extremas, para reduzir a formação de espuma e névoa. São usados em rosqueamento, brochamento, perfuração, engrenagens etc. O contato com a água causa rancidez e os torna suscetíveis ao ataque microbiano. Essas desvantagens limitam a aplicação de óleos integrais em operações de usinagem de alta velocidade (KATNA *et al.*, 2020).

2.7.7. Fluidos miscíveis em água

Os fluidos miscíveis em água são concentrados emulsificáveis que se dissolvem prontamente em água e proporcionam um bom efeito de resfriamento e lubrificação. A água é o ingrediente principal, ~ 95%, neste tipo. Para tornar o óleo solúvel em água, ele é misturado com aditivos como surfactantes, emulsificantes e dispersantes. Alguns outros aditivos, como inibidor de corrosão, biocidas, antiespuma etc. são adicionados. Eles fornecem excelente resfriamento além da lubrificação e são amplamente usados em usinagem de alta velocidade, como fresamento, torneamento e retificação. No entanto, eles são propensos à quebra de emulsão e ataque microbiano e precipitação na peça de trabalho e na máquina (KATNA *et al.*, 2020).

2.7.8. Emulsões

As emulsões são misturas de óleo e água. São compostas de pequena porcentagem de um concentrado de óleo emulsificável, usualmente óleo mineral ou vegetal, emulsificadores e outros ingredientes, dispersos em pequenas gotículas de água. Os emulsificadores são

substâncias que minimizam a tensão superficial da água, facilitando a dispersão do óleo na água, mantendo-o disperso como uma solução estável (DINIZ *et al.*, 2014).

Uma vez que as emulsões sejam essencialmente água, elas possuem alto poder refrigerante. Por outro lado, a presença de óleo mineral ou vegetal, emulsificadores e inibidores de corrosão superam as desvantagens básicas da água que são sua ação corrosiva e baixo poder de umedecimento dos metais. A utilização de aditivos anticorrosivos, como o nitrito de sódio, evita os efeitos nocivos da água presente na emulsão. A adição de biocidas inibe o crescimento de fungos e bactérias, devendo ser compatíveis com a pele humana e não tóxicos (DINIZ *et al.*, 2014).

2.8. PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS (DOE)

Experimentos são uma parte natural do processo de tomada de decisão. As técnicas de planejamento de experimentos com base estatística são particularmente úteis na resolução de problemas de grande importância (MONTGOMERY e RUNGER, 2021). De acordo com Rodrigues e Iemma (2014), pesquisadores e profissionais das indústrias têm buscado técnicas sistemáticas de planejamento de experimentos em função da melhoria contínua nos processos de manufatura.

Montgomery (2017) define planejamento de experimentos como uma sistemática de investigação cujo principal objetivo é o entendimento do comportamento entre as variáveis do sistema e suas respostas, que busca a criação de arranjos eficientes, balanceados e com considerável nível de significância das variáveis de respostas. Essas variáveis são classificadas como variáveis controláveis e incontroláveis (ou ruídos). As variáveis de controle são inerentes ao processo. Os ruídos estão relacionados aos fatores externos.

Montgomery (2017) ressalta três conceitos importantes dentro do planejamento de experimentos:

1. Aleatorização;
2. Replicação;
3. Blocagem.

Aleatorização é o processo de definir a ordem dos tratamentos da matriz experimental, através de sorteios ou por limitações específicas dos testes. Refere-se também ao processo de alocação do material e equipamento às diferentes condições de experimentação.

Replicação é a repetição do experimento básico. Existem duas propriedades importantes desse princípio que são: permitir ao pesquisador obter estimativas do erro experimental; e se a média da amostra é usada para estimar o efeito de um fator no experimento, a replicação também permite obter uma estimativa mais precisa desse efeito.

A blocagem consiste em conter e avaliar a variabilidade produzida pelos fatores perturbadores (controláveis ou não-controláveis) do experimento. Esta técnica permite criar um experimento (grupos ou unidades experimentais balanceadas) mais homogêneo e aumentar a precisão das respostas que são analisadas.

Na realização de um projeto de experimentos há várias etapas a serem seguidas, (MONTGOMERY, 2017):

- a) Reconhecimento e declaração do problema;
- b) Escolha das variáveis de respostas;
- c) Escolha de fatores, níveis e alcances;
- d) Escolha e criação dos experimentos;
- e) Execução dos experimentos;
- f) Análise estatística dos dados;
- g) Conclusões e recomendações.

Dentre as principais técnicas de projetos de experimentos, destacam-se o Planejamento Fatorial Completo, Planejamento Fatorial Fracionado, arranjos de Taguchi e MSR (Metodologia de Superfície de Respostas) (BRITO, 2012), conforme Quadro 1.

Quadro 1 - Principais técnicas de DOE

Técnica Experimental	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Fatorial completo 2^k	Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis.	Não identifica variação intermediária, pois só trabalha em dois níveis. Necessita de um alto número de corridas para problemas com grande número de variáveis.	Processos em que já se tenha um prévio domínio e nos quais as realizações das corridas não demandem maior tempo ou custo.

Técnica Experimental	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Fatorial Fracionado 2^{k-p}	Permite uma pré-análise do processo com um número reduzido de corridas.	Não promove a varredura completa da região experimental.	Processos em que se deseje um pré-conhecimento e nos quais a literatura seja limitada. Corridas que demandem maior tempo ou custo.
Arranjos de Taguchi	Permite a análise de um processo com muitas variáveis de entrada com um número extremamente reduzido de experimentos.	Fornecer uma ideia do processo, porém pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis.	Processos em que haja pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento. Processos com alta dispersão ou em que as corridas demandem alto custo ou tempo
Metodologia de Superfície de Respostas	Permite a verificação de variações intermediárias do processo.	Pode apresentar erros na extrapolação dos pontos estrela, já que são realizadas poucas corridas nesses níveis.	Otimização de processos, principalmente bem conhecidos e com baixa dispersão.

Fonte: adaptado de Brito (2012)

Segundo Jacyna *et al.* (2019), o experimento fatorial completo é um dos experimentos mais utilizados, no qual todas as combinações dos níveis de fatores em estudo são testados no processo experimental.

De acordo com Montgomery e Runger (2021), o ponto ótimo de um processo geralmente está relacionado a pontos estacionários e somente pode ser obtido em superfícies ou funções não-lineares.

No Fatorial Completo, as variáveis de controle apresentam dois níveis, também chamado de fatorial base dois, ou fatorial 2^k , onde k é o número de variáveis de controle consideradas (x_1, x_2, \dots, x_k) e 2^k é o número de combinações experimentais a serem testadas (KARIMIFARD e MOGHADDAM, 2018).

Conforme Kleijnen (1998), o principal problema do experimento fatorial completo é crescimento exponencial das combinações de níveis com o aumento do número de fatores. Tal problema pode ser controlado utilizando-se um planejamento fatorial fracionado, onde um

número reduzido de experimentos torna-se suficiente para avaliar apenas os efeitos principais ou as interações de baixa ordem, sem perda da capacidade de análise do experimento.

Os experimentos fatoriais fracionados consideram uma identidade entre os fatores, tornando impossível estimar o efeito do fator isoladamente, apenas da combinação linear dos fatores (PAIVA *et al.*, 2012). Essa estratégia também é utilizada para os princípios da sequência de experimentação da metodologia de superfície de resposta.

Segundo Montgomery (2017), o Arranjo de Taguchi apresenta uma abordagem híbrida na análise das respostas pela relação sinal-ruído. Tal relação transforma uma resposta em uma função que necessita ser maximizada, simplificando-se o processo de otimização.

Dentre os projetos experimentais, nesta pesquisa utilizou-se experimento fatorial fracionado empregando-se o arranjo CCD (*Central Composite Design*) da Metodologia de Superfície de Resposta.

2.9. METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA (MSR)

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) é um conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas que tem como objetivo o desenvolvimento, melhora e otimização de determinada resposta que sofre influência de diversas variáveis (MONTGOMERY, 2017).

Originalmente, a MSR é atribuída aos trabalhos de George Box e associados durante a década de 1950, (BOX e WILSON, 1951).

A utilização da MSR proporciona ao pesquisador a capacidade de determinar efeitos e interações entre variáveis de controle e de ruído de um processo. Assim, faz-se necessário o projeto de uma série de experimentos e registro de dados para que sejam construídos os modelos de superfície de resposta para validação e otimização (MOHAMMED *et al.*, 2018).

Montgomery (2017) afirma que ao utilizar a MSR o pesquisador não conhece o relacionamento entre as variáveis (controláveis ou incontroláveis), buscando, assim, identificar a relação dessas variáveis através da aproximação por equações matemáticas. Tal metodologia permite a geração de modelos de primeira e segunda ordem onde, para processos sem curvatura, utiliza-se um polinômio conforme Equação 7; e, para processos que apresentam curvaturas, emprega-se um polinômio de segunda ordem, conforme Equação 8. Essas equações representam as relações entre as variáveis de controle (x) e as variáveis de respostas (γ) a partir de dados experimentais.

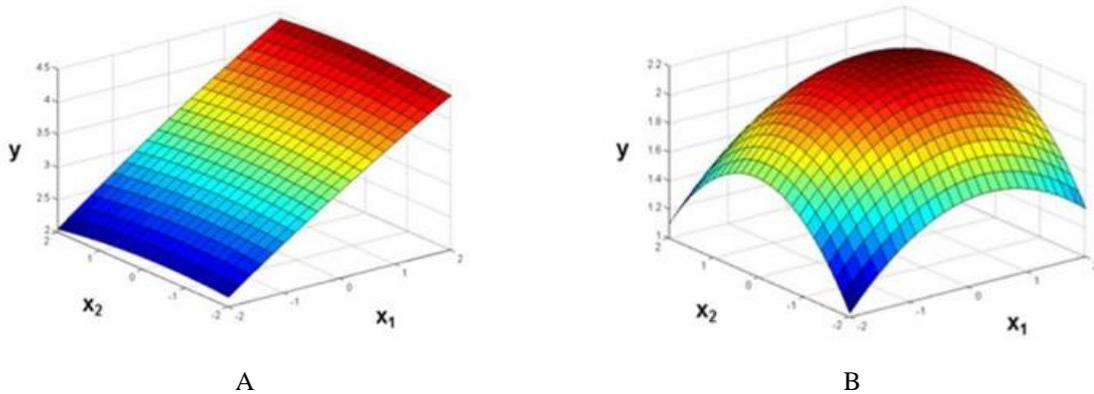
$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{(i=1)}^{(k-1)} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (7)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{(i=1)}^{(k-1)} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \sum_{ii} \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad (8)$$

Onde: y a resposta experimental; x_i e x_j são as variáveis independentes; k é o número de variáveis independentes; β_0 é o coeficiente de regressão do termo independente; β_i é o coeficiente de regressão do termo linear e β_{ij} ($i = 0, 1, 2, \dots, k; j = 0, 1, 2, \dots, k$) é o coeficiente de regressão das interações das variáveis x_i e x_j , β_{ii} é o coeficiente dos termos quadráticos e ε representa o erro amostral.

As Figuras 17 (a) e (b) representam superfícies de respostas para modelos de primeira (A) e segunda (B) ordem.

Figura 17 - Superfícies de resposta para modelos linear e quadrático



Fonte: Brito (2012)

A determinação dos coeficientes de regressão (β 's) é realizada a partir do método dos mínimos quadrados a fim de minimizar a soma dos quadrados dos erros (ε), segundo Montgomery (2017). O objetivo é encontrar o vetor estimado dos mínimos quadrados de $\hat{\beta}$ que minimize a função que pode ser expressa através da Equação 9, (MYERS *et al.*, 2016).

$$L = y^T y - \beta^T X^T y - y^T X \beta + \beta^T X^T X \beta \quad (9)$$

Onde:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \text{ e } \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

Onde y é a matriz com o número de observações realizadas com dimensão $(nx1)$, x é a matriz das variáveis independentes com dimensão (nxk) , β é a matriz dos coeficientes de regressão para o modelo com dimensão $(kx1)$ e ε é a matriz dos erros aleatórios $(nx1)$. Sendo n a quantidade de experimentos executados e k é o número de variáveis independentes.

Reescrevendo a função L , temos a Equação 10:

$$L = y^T y - \beta^T X^T y - y^T X \beta + \beta^T X^T X \beta \quad (10)$$

Como $\beta^T X^T y$ é uma matriz $(1x1)$, ou simplesmente um escalar, a sua transposta $(\beta^T X^T y)^T = y^T X \beta$ é o mesmo escalar. Os estimadores de mínimos quadrados devem satisfazer.

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} = -2X^T y + 2X^T X \beta = 0$$

Assim, simplificando o resultado da derivada parcial em relação a $\hat{\beta}$ obtêm-se a Equação 11:

$$X^T X \beta = X^T y \quad (11)$$

Para estabelecer o estimador de mínimos quadrados de β , o $\hat{\beta}$, multiplicar-se por $(X^T X)^{-1}$ ambos os membros da Equação 12. Realizando esta operação é possível estabelecer os coeficientes dos modelos de regressão, conforme (MYERS *et al.*, 2016).

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (12)$$

Segundo Babu *et al.* (2019), a MSR emprega arranjos experimentais que contribuem para a criação de modelos de regressão preditivos e que produzem um elevado número de informações a partir de um pequeno número de experimentos. Nos processos fabris a abordagem experimental é a mais utilizada uma vez que, através de um número reduzido de

testes, é possível obter a relação entre os fatores de entrada e as respostas, promovendo a identificação dos melhores padrões de processos.

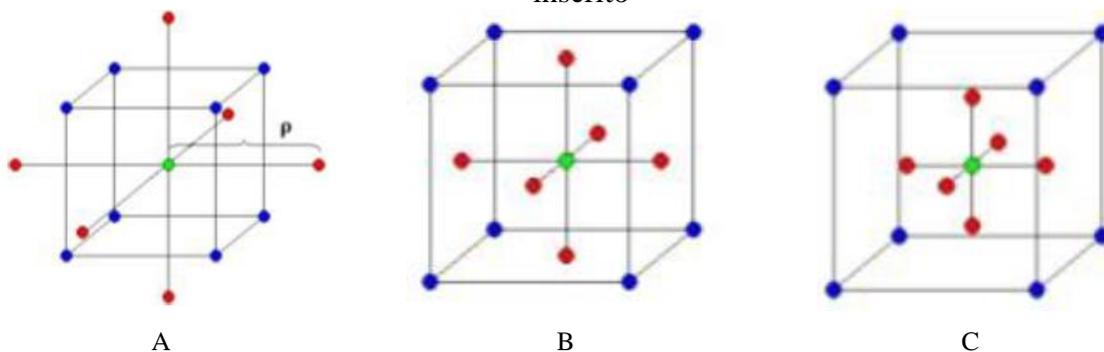
Para realizar a modelagem da superfície de resposta, o método utilizado para a coleta de dados é o CCD (*Central Composite Design – Arranjo Composto Central*), que é considerado como um dos arranjos experimentais que permite gerar modelos de segunda ordem, buscando assim identificar a curvatura do processo e que permite ajuste do modelo de superfície de resposta de segunda ordem (JACYNA *et al.*, 2019; PAIVA *et al.*, 2012; KHAWAJA, 2021).

2.10. ARRANJO COMPOSTO CENTRAL (CCD)

Um CCD é formado por, basicamente, três conjuntos de elementos experimentais para k fatores: um conjunto de pontos fatoriais, obtidos de um fatorial completo (2^k) ou fracionário (2^{k-p}); um conjunto de pontos centrais (p_c); e um conjunto extra chamado de pontos axiais ($2 \times$ pontos fatoriais). A realização do somatório de todos os fatores resulta na quantidade de experimentos que serão realizados. A distância entre o centro do arranjo (pontos centrais) e um ponto axial é comumente representado por ρ , conhecido por raio experimental (PAIVA *et al.*, 2014).

A partir do posicionamento dos arranjos axiais é possível classificar o CCD em arranjo circunscrito (CCC), face centrada (CCF) ou inscrito (CCI), conforme Figura 18 (A, B e C).

Figura 18 - Tipos de arranjo CCD: (A) circunscrito; (B) face centrada; (C) inscrito



Fonte: Montgomery (2017)

Segundo Montgomery (2017) os arranjos CCD apresentam uma propriedade denominada rotacionalidade, que é entendida como a constância na variância para a resposta

prevista a qualquer ponto presente em uma dada circunferência de raio α . Seu valor é diretamente proporcional à quantidade de fatores do experimento, conforme Equação 13.

$$\alpha = \sqrt[4]{2^k} \quad (13)$$

Diversos autores têm estudado processos utilizando a metodologia de superfície de respostas. Makadia e Nanavati (2013) utilizaram MSR para investigar os parâmetros velocidade de corte, efeito do avanço, raio de ponta da ferramenta de corte e profundidade de corte na rugosidade superficial gerada pelo torneamento do aço inoxidável AISI 410.

Almeida *et al.* (2017) propuseram estudo e análise por meio da otimização robusta pelo EQM da média (μ) e variância (σ^2) com o objetivo de avaliar a rugosidade Ra em um conjunto de experimentos no processo de torneamento do aço inoxidável AISI 12L14.

Policena *et al.* (2018) analisaram a influência dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade) utilizados no processo de fresamento frontal de acabamento sobre a rugosidade do aço inoxidável duplex UNS S32205 por meio do planejamento experimental BBD (*Box-Behnken Design*), baseado em MSR. Embora os parâmetros otimizados não terem gerado significativamente valores de rugosidade de superfície inferiores aos obtidos durante os experimentos com $f_z = 0,05\text{mm/dente}$, Curvas de Abbott-Firestone (AFC) e distribuição de probabilidade de amplitude (APD) permitiram a avaliação estatística dos perfis de rugosidade. Além disso, AFC e APD foram importantes na caracterização e diagnóstico do estado superficial obtido pelo fresamento de topo, o que validou e comprovou a eficácia do método de otimização.

2.11. PROJETO DE PARÂMETRO ROBUSTO (PPR)

Projeto de Parâmetro Robusto é definido como sendo a metodologia que tem por interesse a definição de parâmetros de um determinado processo com o objetivo de conseguir produtos e/ou processos robustos à variação de fatores incontrolláveis, também chamados de ruídos (WELCH *et al.*, 1990).

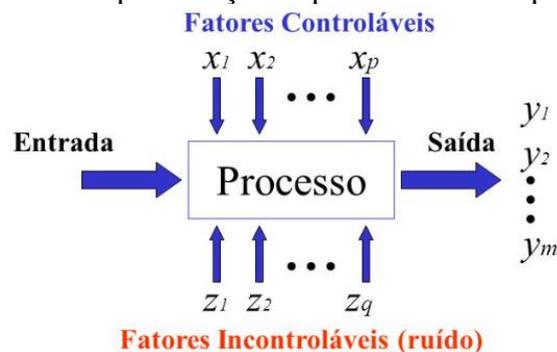
Segundo Pereira (2017), o projeto de parâmetros robustos foi desenvolvido por Taguchi na década de 1980 com o objetivo de minimizar os efeitos dos ruídos que interferem no processo. Montgomery (2017) ressalta que o objetivo do PPR é garantir que a média da

resposta em estudo esteja dentro do nível ou alvo desejado e que a variabilidade ao redor desse valor seja a menor possível.

De acordo com Dai *et al.* (2021), o objetivo desse método é minimizar os efeitos de fatores não controlados, encontrando as configurações ideais para os fatores controlados, viés de processo e variância com mais precisão.

Processos combinam variáveis controláveis e incontroláveis (ruídos) e que são capazes de transformar entrada em saída (resposta), (MONTGOMERY, 2017), sendo X_1, X_2, \dots, X_p representando as variáveis de controle e $z_1, z_2, z_3 \dots, z_q$ representando os ruídos do processo, conforme Figura 19.

Figura 19 - Representação esquemática de um processo



Fonte: Montgomery (201)

Originalmente chamado de arranjo cruzado, o projeto de parâmetros robustos é realizado por dois planejamentos experimentais, sendo um arranjo interno e outro externo. O arranjo interno está relacionado com as variáveis de controle e o externo com os ruídos. Em seguida esses arranjos são cruzados de modo a fornecer um resumo da média de cada observação do arranjo interno sobre o externo e outro resumo estatístico da tentativa de combinação entre média e variância e razão sinal/ruído (VINING e MYERS, 1990). Em função do alto número de experimentos, seu custo e tempo de análise pode ser elevado.

Taguchi incorpora a variabilidade do processo no desempenho da resposta, sendo essa uma das contribuições mais importantes dessa abordagem. Entretanto, Box *et al.* (1988) apresentam algumas ineficiências relativas à modelagem da média e variância, a incapacidade de medir a interação e o excessivo número de ensaios.

Dessa forma, pesquisadores tem unido a metodologia inicial proposta por Taguchi com o planejamento de experimentos, modelagem padronizada da média e variância e, MSR, tendo desenvolvido o arranjo combinado (VINING e MYERS, 1990).

Arranjos combinados são definidos como sendo o sequenciamento de experimentos nos quais as variáveis de ruído, para fins de experimentação, são tratadas como variáveis de controle e, dessa forma, variáveis de controle e ruídos são combinadas em um único arranjo experimental. Dessa forma, a partir das informações coletadas nos experimentos, é possível a construção de um modelo de superfície de resposta que relaciona as variáveis de controle, os ruídos e suas interações. A Equação 14 descreve o modelo de segunda ordem desenvolvido a partir de um arranjo combinado (MONTGOMERY, 2017).

$$y(x, z) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^r y_i z_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r \delta_{ij} x_i z_j + \varepsilon \quad (14)$$

Onde:

y – resposta de interesse

x_i – variáveis de controle

z_i – variáveis de ruído

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}, y_i, \delta_{ij}$ – coeficientes a serem estimados

k – número de variáveis de controle

r – número de variáveis de ruído

ε – erro experimental

Welch *et al.* (1990) realizaram um planejamento de experimentos que contemplou variáveis de controle e ruídos que foi chamado de arranjo combinado, onde foi requerido um número menor de experimentos que os arranjos cruzados. Shoemaker *et al.* (1991) realizaram um arranjo combinado onde foi destacada a importância do método na estimação de interações entre as variáveis de controle e ruído. Shin *et al.* (2011) realizaram uma otimização biobjetiva para duas características de qualidade EQM₁ e EQM₂ utilizando a metodologia de Tchebycheff lexicográfico ponderado. Paiva *et al.* (2009) utilizaram a abordagem do PPR combinada com a metodologia de superfície de resposta e análise de componentes principais (ACP) para um caso bivariado no torneamento do aço AISI 52100.

Brito (2012) utilizou um arranjo combinado para definir as equações de EQM em um processo de fresamento do aço SAE 1045. Os resultados mostraram que o processo foi

sensível as variáveis de ruído. Portanto, com a aplicação do PPR é possível identificar parâmetros das variáveis de controle que minimizem as variáveis de ruído, tornando o processo mais robusto.

Almeida *et al.* (2017) modelaram as equações de média e variância da rugosidade R_a , durante o torneamento do aço 12L14, utilizando abordagem PPR. A velocidade de corte, avanço e profundidade de corte foram as variáveis controláveis do processo, enquanto as ferramentas novas e desgastadas (com $VB_{\text{máx}} = 0,25$ mm) foram as variáveis de ruído.

Souza *et al.* (2022) propuseram uma estratégia de otimização robusta para analisar o trade-off entre os objetivos conflitantes de minimizar o tempo de corte e a distância entre o valor real da média e a rugosidade total de seus respectivos alvos, juntamente com a variação causada pelo desgaste de flanco no torneamento de acabamento a seco do aço AISI 52100 endurecido. As metodologias utilizadas foram: projeto de parâmetros robustos, metodologia de superfície de resposta, matriz combinada, erro quadrático médio multivariado e interseção de limite normal. Velocidade de corte, taxa de avanço e profundidade de corte foram os fatores de processo considerados. Os resultados mostraram que o efeito do desgaste de flanco foi estatisticamente significativo para as rugosidades R_a e R_t , variáveis de resposta.

2.12. ARRANJO COMBINADO

O arranjo combinado foi desenvolvido com o objetivo de suprir eventuais dificuldades do arranjo cruzado, onde a modelagem é feita na resposta e não na perda. Assim, faz-se necessário realizar somente um planejamento de experimentos, onde são consideradas as variáveis de controle e ruído simultaneamente, reduzindo assim a quantidade de experimentos (WELCH *et al.*, 1990).

Uma equação de regressão denominada modelo de resposta pode ser gerada a partir da realização de experimentos que incluem variáveis de controle e de ruído com base em estimativas onde é possível avaliar os efeitos principais e suas interações (SHOEMAKER *et al.*, 1991; WELCH *et al.*, 1990).

De acordo com Montgomery (2017), a chave para a resolução de um problema que envolve projeto de parâmetros robustos é análise da interação entre variáveis de controle e ruídos. A utilização de um modelo para a resposta que inclua todas as variáveis assim como as interações torna-se importante e de grande interesse para esse tipo de planejamento experimental, conforme Equação 15.

$$y = f(x, z) \quad (15)$$

Onde:

y - o conjunto de características de qualidades ou performances associada a um produto

x - o conjunto dos fatores controláveis e

z - é o conjunto dos fatores incontroláveis.

Kwon (2017) propôs a otimização simultânea de resposta múltipla para o projeto robusto usando a abordagem de matriz combinada. A abordagem de matriz combinada permite fornecer estimativas separadas para a resposta média e para a resposta de variância.

Silva *et al.* (2021) aplicaram um procedimento inovador para a otimização de problemas experimentais com respostas múltiplas, que considerou a inserção de incertezas nos coeficientes das funções empíricas obtidas para representar adequadamente situações reais. Esse procedimento, que combina o RSM com o método dos elementos finitos (FE) e a otimização por simulação de Monte Carlo (OvMCS), foi aplicado a um processo real de estampagem de uma empresa automotiva multinacional brasileira. Destaca-se que o procedimento proposto reduziu, e por vezes eliminou, a necessidade de experimentos adicionais de confirmação, bem como um melhor ajuste dos valores dos fatores e das variáveis de resposta quando comparados aos resultados do RSM com respostas múltiplas clássicas.

Brito *et al.* (2016) propuseram em seu trabalho, uma evolução de métodos apresentando uma abordagem denominada Erro Quadrático Médio Ponderado (EQMP) na otimização do processo de fresamento de topo do aço AISI 1045. Utilizaram fatores controláveis, fatores de ruído e as variáveis de resposta para validação da metodologia proposta. A efetividade do método apresentado confirmou os resultados obtidos, além de verificar a robustez do processo.

2.13. OTIMIZAÇÃO ROBUSTA DAS CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE

Após o desenvolvimento das equações de média e variância, a otimização do processo pode ser conduzida com o emprego de variadas técnicas de otimização de múltiplos objetivos como, por exemplo, o Erro Quadrado Médio (EQM). Mood (1974) afirma que o Erro

Quadrático Médio deva ser utilizado para medir a distância dos desvios quadráticos de um estimador, que se baseia em uma medida de aproximação ou ajuste.

Brito *et al.* (2016) relatam que, considerando a otimização robusta, o EQM é uma combinação de funções objetivo que relacionam a média $\hat{y}(x)$ e a variância $\widehat{\sigma}^2(x)$ em uma resposta única, além do alvo desejado.

Brito *et al.* (2014) afirmam que a função EQM proporciona a otimização conjunta dos valores de média e variância contribuindo para a melhora de um processo e a maximização de qualidade do produto.

A minimização do Erro Quadrático Médio assegura que o valor da resposta esteja o mais próximo possível do seu alvo, apresentando o mínimo de variabilidade. A Equação 16 apresenta a como a otimização é realizada.

$$\text{Minimizar } EQM(y) = [\mu(y) - T_y]^2 + \sigma^2(y) \quad (16)$$

Sujeito a: $x^T x \leq \alpha^2$

Onde:

$EQM(y)$ - erro quadrático médio da resposta y

$\mu(y)$ - modelo para a média da resposta y

T_y - alvo da resposta y

$\sigma^2(y)$ - modelo para a variância da resposta y

$x^T x < \alpha^2$ - restrição de esfericidade para o espaço experimental.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. MATERIAL

O corpo de provas utilizado nos experimentos foi de aço inoxidável duplex UNS S32205, com medidas de 115 x 115 x 170 mm, dureza 250 HB e composição química conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do aço inoxidável duplex UNS S32205 (% em peso)

C	Si	Mn	P	S	N	Al	Cr	Mo	Ni	Cu	W	Co
0,013	0,47	1,22	0,019	0,010	0,19	0,008	22,20	3,14	5,62	0,19	0,02	0,05

Fonte: International Molybdenum Association (2012)

3.2. MÁQUINA E FERRAMENTAS

Os experimentos de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 foram executados em um centro de usinagem CNC Eurostec, modelo CY-VMC850, com 15kW de potência e rotação máxima de 10.000 RPM, conforme Figura 20.

Figura 20 - Centro de usinagem Eurostec



Fonte: Autoria Própria

A ferramenta utilizada foi a fresa CoroMill® R390-025A25-11M (SANDVIK COROMANT, 2023), diâmetro 25 mm, ângulo de posição $K_{\text{apa-r}} = 90^\circ$, haste cilíndrica, passo médio com 3 insertos e fixação mecânica por pinça. A fresa utilizada durante os experimentos pode ser visualizada na Figura 21.

Figura 21 - Fresa de topo R390-025A25-11M



Fonte: autoria própria

Os insertos foram de metal duro ISO M30, código R390-11T308M-MM 2030 (SANDVIK COROMANT, 2023) com dupla camada de nitreto de titânio (TiN) e nitreto de titânio alumínio (TiAlN), conforme Figura 22.

Figura 22 - Inserto de metal duro R390-11T308M-MM 2030



Fonte: autoria própria

Foi utilizado o fluido de corte ME-2 que é um óleo solúvel sintético, concentrado (elevada taxa de diluição em água), ecológico (isento de nitritos, cloro, enxofre, solventes aromáticos e metais pesados), que refrigera e lubrifica com rendimento e vida útil bastante satisfatória. Com ação anticorrosiva, não ataca os componentes da máquina-ferramenta e do material usinado. Não causa risco à saúde do operador nem produz vapores irritantes no ambiente de trabalho.

De acordo com o fabricante Quimatic Tapmatic do Brasil (2012), o produto é de aplicação universal sendo recomendado para operações de rosqueamento e usinagem pesada. É indicado para usinagem de metais em máquinas que trabalham com óleos de corte recirculante. O fluido foi utilizado nas concentrações 0%, 10% e 20% em todos os ensaios realizados.

3.3. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS

Para a realização deste trabalho, as variáveis de controle (x) escolhidas foram: velocidade de corte (v_c), avanço por dente (f_z), profundidade de usinagem (a_p) e penetração de trabalho (a_e). Segundo Diniz *et al.* (2014), essas são as variáveis que exercem maior influência durante o processo de fresamento, especialmente no desgaste da ferramenta e no acabamento superficial do material para os valores para as variáveis de controle, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Variáveis de controle e respectivos níveis

Variáveis de controle	Símbolo	Níveis do processo				
		-2,83	-1	0	1	2,83
Velocidade de corte – v_c (m/min)	x_1	32,50	60,00	75,00	90,00	117,40
Avanço por dente – f_z (mm/dente)	x_2	0,04	0,10	0,13	0,16	0,21
Penetração de trabalho – a_e (mm)	x_3	12,26	15,00	16,50	18,00	20,74
Profundidade de usinagem – a_p (mm)	x_4	0,43	0,80	1,00	1,20	1,57

Fonte: autoria própria

As variáveis de ruído (z) selecionadas foram o desgaste do flanco da ferramenta (v_b), a vazão de fluido (Q) e a concentração do fluido de corte (C). Os níveis adotados para as variáveis de ruído foram definidos considerando dados da literatura e observações realizadas durante os ensaios preliminares, conforme Tabela 5. As respostas consideradas nesta pesquisa foram as rugosidades R_a e R_t (μm).

Tabela 5 - Variáveis de ruído e níveis correspondentes

Variáveis de ruídos	Símbolo	Níveis do processo		
		-1	0	1
Desgaste de flanco da ferramenta – v_b (mm)	z_1	0,00	0,15	0,30
Vazão do fluido – Q (l/min)	z_2	0	10	20
Concentração do fluido – C (%)	z_3	0	10	20

Fonte: autoria própria

3.4. INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

As medições dos desgastes de flanco na superfície de folga das pastilhas (v_b) foram obtidas em um analisador de imagem acompanhado do respectivo *software Captur 2.1*. Este equipamento é constituído de um microscópio metalográfico trinocular, marca Opton Microscópios, modelo TNM-08T-PL, com ampliação de até 100 vezes, acoplado a uma câmera de vídeo, marca Biocentrix, modelo 5MP, em um computador compatível, conforme Figura 23.

Figura 23 - Montagem do microscópio



Fonte: autoria própria

A medição dos valores de rugosidade do corpo de prova foi registrada pelo medidor de rugosidade superficial modelo SurfTest SJ-210 fabricado pela Mitutoyo, Figura 24, aferido e calibrado antes do início das medições. O parâmetro de *cut-off* foi ajustado para 0,8 mm em todas as medidas (GROUS, 2011).

Figura 24 - Rugosímetro portátil utilizado nos experimentos



Fonte: Mitutoyo Corporation (2023)

Os valores medidos para as variáveis de resposta foram obtidos durante cada passada da unidade de avanço com auxílio de um cabo USB até ao computador e posteriormente registrados em planilha eletrônica.

3.5. PROBLEMA DE PESQUISA

A rugosidade sofre influência de diversos parâmetros de usinagem, que incluem a geometria da ferramenta de corte, a geometria da peça, a rigidez da máquina-ferramenta, o material da peça, as condições de corte e o material da ferramenta (SILVA *et al.*, 2021).

Busca-se com a otimização do processo de fresamento do aço inoxidável duplex UNS S32205 a identificação da combinação ótima dos parâmetros de usinagem de forma que permitam a otimização das características geométricas da rugosidade (R_a e R_t) da peça usinada, garantindo paralelamente, melhor qualidade da superfície usinada. Deseja-se então:

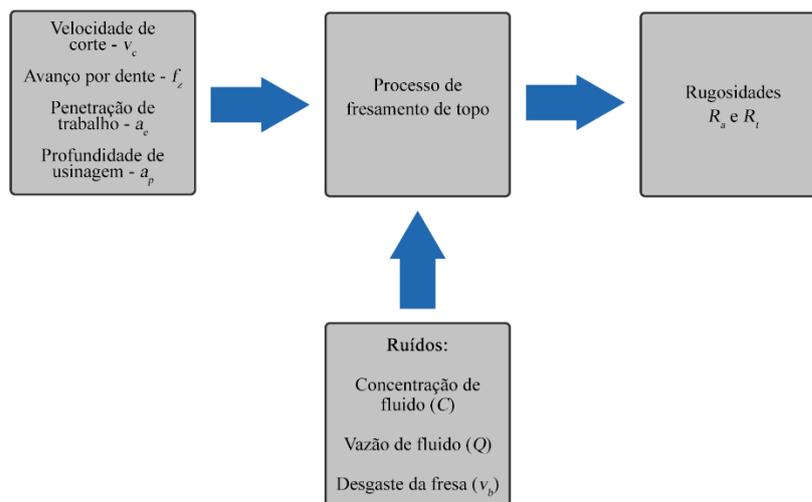
- Minimizar a rugosidade da superfície com ferramentas novas;
- Minimizar a rugosidade da superfície com ferramentas desgastadas com 0,15mm e 0,30mm;
- Minimizar a concentração de fluido;

- Minimizar a vazão de fluido.

O objeto de estudo descrito anteriormente o caracteriza como um problema complexo de otimização uma vez que se deseja otimizar múltiplas respostas, considerando que o processo de fresamento utilizado é composto por múltiplos parâmetros de entrada. A abordagem científica para um problema desse tipo torna-se relevante para que as ferramentas de análise possam ser corretamente definidas, possibilitando que os resultados alcançados sejam coerentes e significativos para os parâmetros de rugosidade (R_a e R_t). Para o modelo em questão, uma nova condição foi adicionada, o comportamento da otimização na presença de fatores de ruídos de forma a demonstrar ser possível dar o devido tratamento e obter parâmetros compatíveis de usinagem. A Figura 25 apresenta o diagrama do processo para o sistema investigado.

As variáveis de controle que foram adotadas para esse procedimento são velocidade de corte (v_c), avanço por dente (f_z), profundidade de usinagem (a_p) e penetração de trabalho (a_e). Reconhecidamente, essas são as variáveis mais importantes uma vez que influenciam fortemente o processo de fresamento, especialmente o acabamento superficial da peça e o desgaste da ferramenta (DINIZ *et al.*, 2014).

Figura 25 - Processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205



Fonte: autoria própria

3.6. MÉTODO EXPERIMENTAL

O presente trabalho tem como objetivo o estudo e otimização do processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 com análise dos fatores de ruídos. A metodologia utilizada neste trabalho poderá ser aplicada a outros trabalhos, desde que possuam características similares.

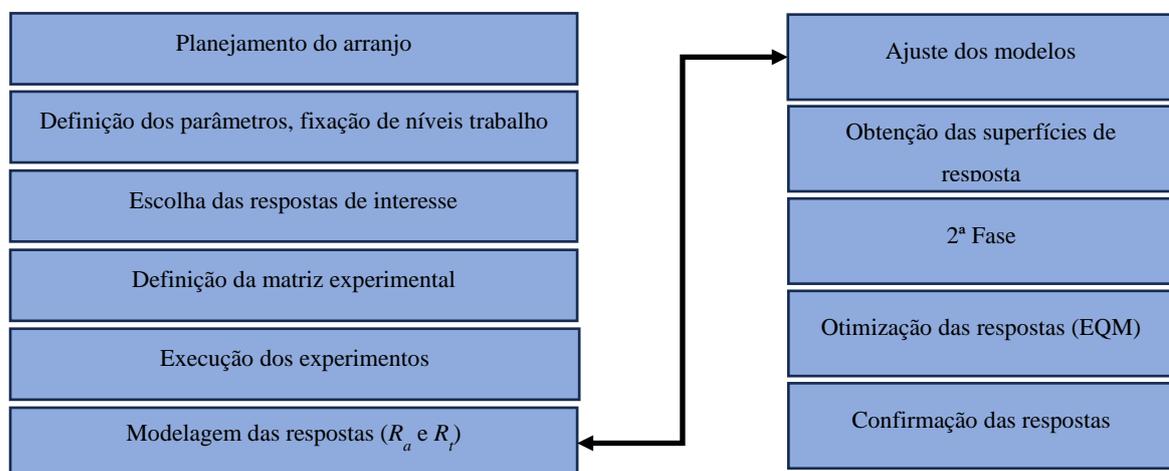
Trata-se de uma pesquisa de natureza aplicada, de objetivo exploratório, abordagem quantitativa e utilizando método experimental (BRYMAN, 2005). Dentre as técnicas de experimentação, o Projeto e Análise de Experimentos foi empregado para que os dados fossem coletados e em seguida analisados por métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas (MONTGOMERY, 2017).

O levantamento dos dados é uma das atividades mais importantes na execução do trabalho. Um banco de dados inadequado conduz a resultados questionáveis. Assim, é de grande importância o planejamento detalhado do experimento, bem como a adequada execução e registro dos resultados.

O experimento foi dividido em 2 fases, onde a primeira foi direcionada ao planejamento dos experimentos, coleta dos dados, modelagem das respostas e análise das influências dos parâmetros nas respostas de superfície R_a e R_t . A segunda etapa consistiu em obter a combinação ótima dos parâmetros de trabalho que permitissem a maximização dos resultados do processo.

A Figura 26 apresenta o fluxograma da metodologia empregada para realizar a otimização multiobjetivo no processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205.

Figura 26 - Fluxograma do método experimental



Fonte: autoria própria

3.7. DEFINIÇÃO DA MATRIZ EXPERIMENTAL

Neste trabalho foi utilizado um arranjo composto central (CCD) com sete variáveis, sendo quatro de controle e três de ruídos. O CCD é um arranjo experimental da Metodologia de Superfície de Resposta que incorpora aos experimentos fatoriais um conjunto de pontos centrais e um conjunto de níveis extras denominados pontos axiais (MONTGOMERY, 2017).

Os pontos axiais relacionados aos ruídos foram excluídos uma vez que, experimentalmente, seus valores não são passíveis de execução. Foi utilizado um projeto fatorial de meia fração com 64 pontos fatoriais, 8 pontos axiais e 10 pontos centrais, totalizando 82 experimentos. A distância axial ou raio de região experimental α é de 2,83.

Um arranjo combinado apresenta em sua parte superior $nf = 2^{k+r}$ pontos fatoriais com o objetivo de garantir a estimativa dos efeitos lineares das variáveis de controle e ruídos, das interações entre as variáveis de controle e a interação entre as variáveis de ruídos, o que garante a robustez do processo. O arranjo é composto por $n_a = 2k$ pontos axiais, que se referem apenas às variáveis do processo. O arranjo contém ainda, n_c pontos centrais que são utilizados para estimar o erro experimental de forma independente e auxiliar na estimativa dos efeitos de curvatura para as variáveis do processo (PEREIRA, 2017).

Foi utilizado o *software* estatístico Minitab® (2021) para a construção do CCD conforme Tabela 6, tendo sido gerado um conjunto sequencial de corridas experimentais com quatro fatores de controle e três variáveis de ruído. As variáveis de controle que foram analisadas são velocidade de corte (x_1), avanço por dente (x_2), penetração de trabalho (x_3) e profundidade de usinagem (x_4). As variáveis de ruído foram desgaste de flanco da ferramenta (z_1), vazão do fluido de corte (z_2) e a concentração do fluido de corte (z_3).

Tabela 6 - Planejamento experimental

Experimentos	Variáveis de controle				Variáveis de ruído		
	x_1	x_2	x_3	x_4	z_1	z_2	z_3
1	60	0,10	15	0,8	0,0	0,0	20
2	90	0,10	15	0,8	0,0	0,0	0,0
3	60	0,16	15	0,8	0,0	0,0	0,0
4	90	0,16	15	0,8	0,0	0,0	20
5	60	0,10	18	0,8	0,0	0,0	0,0
6	90	0,10	18	0,8	0,0	0,0	20
7	60	0,16	18	0,8	0,0	0,0	20
8	90	0,16	18	0,8	0,0	0,0	0,0
9	60	0,10	15	1,2	0,0	0,0	0,0

Experimentos	Variáveis de controle				Variáveis de ruído		
	x_1	x_2	x_3	x_4	z_1	z_2	z_3
10	90	0,10	15	1,2	0,0	0,0	20
11	60	0,16	15	1,2	0,0	0,0	20
12	90	0,16	15	1,2	0,0	0,0	0,0
13	60	0,10	18	1,2	0,0	0,0	20
14	90	0,10	18	1,2	0,0	0,0	0,0
15	60	0,16	18	1,2	0,0	0,0	0,0
16	90	0,16	18	1,2	0,0	0,0	20
17	60	0,10	15	0,8	0,3	0,0	0,0
18	90	0,10	15	0,8	0,3	0,0	20
19	60	0,16	15	0,8	0,3	0,0	20
20	90	0,16	15	0,8	0,3	0,0	0,0
21	60	0,10	18	0,8	0,3	0,0	20
22	90	0,10	18	0,8	0,3	0,0	0,0
23	60	0,16	18	0,8	0,3	0,0	0,0
24	90	0,16	18	0,8	0,3	0,0	20
25	60	0,10	15	1,2	0,3	0,0	20
26	90	0,10	15	1,2	0,3	0,0	0,0
27	60	0,16	15	1,2	0,3	0,0	0,0
28	90	0,16	15	1,2	0,3	0,0	20
29	60	0,10	18	1,2	0,3	0,0	0,0
30	90	0,10	18	1,2	0,3	0,0	20
31	60	0,16	18	1,2	0,3	0,0	20
32	90	0,16	18	1,2	0,3	0,0	0,0
33	60	0,10	15	0,8	0,0	20	0,0
34	90	0,10	15	0,8	0,0	20	20
35	60	0,16	15	0,8	0,0	20	20
36	90	0,16	15	0,8	0,0	20	0,0
37	60	0,10	18	0,8	0,0	20	20
38	90	0,10	18	0,8	0,0	20	0,0
39	60	0,16	18	0,8	0,0	20	0,0
40	90	0,16	18	0,8	0,0	20	20
41	60	0,10	15	1,2	0,0	20	20
42	90	0,10	15	1,2	0,0	20	0,0
43	60	0,16	15	1,2	0,0	20	0,0
44	90	0,16	15	1,2	0,0	20	20
45	60	0,10	18	1,2	0,0	20	0,0
46	90	0,10	18	1,2	0,0	20	20
47	60	0,16	18	1,2	0,0	20	20
48	90	0,16	18	1,2	0,0	20	0,0
49	60	0,10	15	0,8	0,3	20	20
50	90	0,10	15	0,8	0,3	20	0,0
51	60	0,16	15	0,8	0,3	20	0,0

Experimentos	Variáveis de controle				Variáveis de ruído		
	x_1	x_2	x_3	x_4	z_1	z_2	z_3
52	90	0,16	15	0,8	0,3	20	20
53	60	0,10	18	0,8	0,3	20	0,0
54	90	0,10	18	0,8	0,3	20	20
55	60	0,16	18	0,8	0,3	20	20
56	90	0,16	18	0,8	0,3	20	0,0
57	60	0,10	15	1,2	0,3	20	0,0
58	90	0,10	15	1,2	0,3	20	20
59	60	0,16	15	1,2	0,3	20	20
60	90	0,16	15	1,2	0,3	20	0,0
61	60	0,10	18	1,2	0,3	20	20
62	90	0,10	18	1,2	0,3	20	0,0
63	60	0,16	18	1,2	0,3	20	0,0
64	90	0,16	18	1,2	0,3	20	20
65	32,57	0,13	16,5	1,0	0,15	10	10
66	117,43	0,13	16,5	1,0	0,15	10	10
67	75	0,045	16,5	1,0	0,15	10	10
68	75	0,215	16,5	1,0	0,15	10	10
69	75	0,13	12,3	1,0	0,15	10	10
70	75	0,13	20,7	1,0	0,15	10	10
71	75	0,13	16,5	0,4	0,15	10	10
72	75	0,13	16,5	1,6	0,15	10	10
73	75	0,13	16,5	1,0	0,15	10	10
74	75	0,13	16,5	1,0	0,15	10	10
75	75	0,13	16,5	1,0	0,15	10	10
76	75	0,13	16,5	1,0	0,15	10	10
77	75	0,13	16,5	1,0	0,15	10	10
78	75	0,13	16,5	1,0	0,15	10	10
79	75	0,13	16,5	1,0	0,15	10	10
80	75	0,13	16,5	1,0	0,15	10	10
81	75	0,13	16,5	1,0	0,15	10	10
82	75	0,13	16,5	1,0	0,15	10	10

Fonte: autoria própria

3.8. EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Todos os experimentos foram executados no sentido concordante, ou seja, a rotação da ferramenta coincide com o sentido de avanço da mesa do centro de usinagem Eurostec. A Figura 27 ilustra a área de trabalho da máquina com o corpo de prova fixado na mesa.

Figura 27 - Montagem do corpo de prova: (1) ferramenta; (2) corpo de prova; (3) dispositivo de fixação do corpo de prova; (4) mesa fresadora



Fonte: autoria própria

As superfícies de componentes mecânicos devem ser adequadas ao tipo de função que exercem. Por esse motivo, a importância do estudo do acabamento superficial aumenta à medida que crescem as exigências do projeto. Superfícies de componentes deslizantes, como eixo de um mancal, devem ser lisas para minimização do atrito. Tal exigência não é tão rigorosa como no caso das superfícies externas da tampa e base de um mancal, por exemplo (RODRIGUES *et al.*, 2020).

Há vários parâmetros de usinagem que podem afetar diretamente o acabamento da superfície da peça usinada. Os principais agentes externos que podem influenciar na rugosidade da superfície são: material da peça a ser usinada e da ferramenta de corte e as condições de corte, rigidez da máquina-ferramenta (MACHADO *et al.*, 2009).

A condição experimental do arranjo foi conduzida para os 82 experimentos. O corpo de prova foi fresado considerando três tipos de desgaste da ferramenta (nova, com desgaste de 0,15 e 0,30 mm). Foram utilizadas as condições de ruído gerais que ocorrem durante quaisquer operações de fresamento, reproduzindo de certa forma o comportamento da ferramenta durante o processo de fresamento e as condições que ocorrem simultaneamente ao desgaste da ferramenta. Nessas condições, os valores das rugosidades sofrerão algum tipo de variação, independentemente da configuração de controle do processo de usinagem. Dessa forma, o objetivo principal do projeto de parâmetro robusto (PPR) é identificar os parâmetros de configuração de controle capaz de alcançar uma rugosidade reduzida e com mínima dispersão. O rugosímetro foi montado sobre o corpo de provas com movimento deslizante no

sentido horizontal para facilitar a aproximação e o contato com a superfície usinada. Com isso, o erro a cada medição tem dispersão menor ao aproximar o contato do rugosímetro com a superfície usinada. Foram realizadas três medições de rugosidade ao longo do comprimento da peça, sendo duas nas extremidades e uma no centro de cada penetração de trabalho (a_e) para cada condição de ensaio, conforme Figura 28.

Figura 28 - Registro da rugosidade: (1) rugosímetro; (2) corpo de prova



Fonte: autoria própria

Os resultados das medições dos experimentos de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 foram compilados conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados experimentais

Experimentos	Variáveis de controle				Variáveis de ruídos			Respostas	
	v_c [m/min]	f_z [mm/dente]	a_e [mm]	a_p [mm]	v_b [mm]	Q [l/min]	C [%]	R_a (μm)	R_t (μm)
1	60	0,1	15	0,8	0	0	20	0,520	4,210
2	90	0,1	15	0,8	0	0	0	0,347	2,760
3	60	0,16	15	0,8	0	0	0	0,630	3,667
4	90	0,16	15	0,8	0	0	20	0,717	5,039
5	60	0,1	18	0,8	0	0	0	0,503	3,810
6	90	0,1	18	0,8	0	0	20	0,360	2,698
7	60	0,16	18	0,8	0	0	20	0,657	3,513
8	90	0,16	18	0,8	0	0	0	0,747	4,473
9	60	0,1	15	1,2	0	0	0	0,503	3,810
10	90	0,1	15	1,2	0	0	20	0,303	2,412
11	60	0,16	15	1,2	0	0	20	0,653	3,877
12	90	0,16	15	1,2	0	0	0	0,700	4,433
13	60	0,1	18	1,2	0	0	20	0,487	4,170
14	90	0,1	18	1,2	0	0	0	0,317	2,573
15	60	0,16	18	1,2	0	0	0	0,653	3,876
16	90	0,16	18	1,2	0	0	20	0,737	3,777
17	60	0,1	15	0,8	0,3	0	0	0,837	5,063
18	90	0,1	15	0,8	0,3	0	20	0,867	4,912
19	60	0,16	15	0,8	0,3	0	20	0,637	4,207
20	90	0,16	15	0,8	0,3	0	0	0,960	5,664
21	60	0,1	18	0,8	0,3	0	20	0,930	5,481
22	90	0,1	18	0,8	0,3	0	0	0,813	4,897
23	60	0,16	18	0,8	0,3	0	0	0,667	3,513
24	90	0,16	18	0,8	0,3	0	20	1,003	5,630
25	60	0,1	15	1,2	0,3	0	20	0,958	5,652
26	90	0,1	15	1,2	0,3	0	0	0,858	5,492
27	60	0,16	15	1,2	0,3	0	0	0,683	4,517
28	90	0,16	15	1,2	0,3	0	20	1,033	5,800
29	60	0,1	18	1,2	0,3	0	0	0,971	5,729
30	90	0,1	18	1,2	0,3	0	20	0,719	5,053
31	60	0,16	18	1,2	0,3	0	20	0,670	4,960
32	90	0,16	18	1,2	0,3	0	0	1,097	6,595
33	60	0,1	15	0,8	0	20	0	0,453	3,897
34	90	0,1	15	0,8	0	20	20	0,277	2,248
35	60	0,16	15	0,8	0	20	20	0,570	4,195
36	90	0,16	15	0,8	0	20	0	0,630	4,697
37	60	0,1	18	0,8	0	20	20	0,403	3,150
38	90	0,1	18	0,8	0	20	0	0,270	2,191
39	60	0,16	18	0,8	0	20	0	0,487	4,170

Continuação da Tabela 7 - Resultados experimentais

Experimentos	Variáveis de controle				Variáveis de ruídos			Respostas	
	v_c	f_z	a_e	a_p	v_b	Q	C	R_a	R_t
	[m/min]	[mm/dente]	[mm]	[mm]	[mm]	[l/min]	[%]	(μm)	(μm)
40	90	0,16	18	0,8	0	20	20	0,657	3,513
41	60	0,1	15	1,2	0	20	20	0,440	3,717
42	90	0,1	15	1,2	0	20	0	0,287	2,327
43	60	0,16	15	1,2	0	20	0	0,523	4,210
44	90	0,16	15	1,2	0	20	20	0,693	4,797
45	60	0,1	18	1,2	0	20	0	0,430	3,193
46	90	0,1	18	1,2	0	20	20	0,243	1,800
47	60	0,16	18	1,2	0	20	20	0,540	3,827
48	90	0,16	18	1,2	0	20	0	0,667	4,938
49	60	0,1	15	0,8	0,3	20	20	0,716	4,197
50	90	0,1	15	0,8	0,3	20	0	0,707	4,967
51	60	0,16	15	0,8	0,3	20	0	0,447	3,527
52	90	0,16	15	0,8	0,3	20	20	0,840	5,717
53	60	0,1	18	0,8	0,3	20	0	0,820	5,603
54	90	0,1	18	0,8	0,3	20	20	0,773	4,681
55	60	0,16	18	0,8	0,3	20	20	0,510	4,010
56	90	0,16	18	0,8	0,3	20	0	0,800	5,187
57	60	0,1	15	1,2	0,3	20	0	0,823	5,263
58	90	0,1	15	1,2	0,3	20	20	0,723	4,240
59	60	0,16	15	1,2	0,3	20	20	0,593	3,683
60	90	0,16	15	1,2	0,3	20	0	0,830	6,570
61	60	0,1	18	1,2	0,3	20	20	0,873	4,950
62	90	0,1	18	1,2	0,3	20	0	0,603	4,971
63	60	0,16	18	1,2	0,3	20	0	0,620	5,020
64	90	0,16	18	1,2	0,3	20	20	0,870	5,977
65	32,57	0,13	16,5	1	0,15	10	10	0,754	5,466
66	117,43	0,13	16,5	1	0,15	10	10	0,767	5,012
67	75	0,045	16,5	1	0,15	10	10	0,692	4,918
68	75	0,215	16,5	1	0,15	10	10	1,071	7,058
69	75	0,13	12,3	1	0,15	10	10	0,933	5,504
70	75	0,13	20,7	1	0,15	10	10	0,940	5,546
71	75	0,13	16,5	0,4	0,15	10	10	0,743	4,451
72	75	0,13	16,5	1,6	0,15	10	10	0,784	5,566
73	75	0,13	16,5	1	0,15	10	10	0,530	2,973
74	75	0,13	16,5	1	0,15	10	10	0,393	3,200
75	75	0,13	16,5	1	0,15	10	10	0,413	3,320
76	75	0,13	16,5	1	0,15	10	10	0,393	2,540
77	75	0,13	16,5	1	0,15	10	10	0,387	2,310
78	75	0,13	16,5	1	0,15	10	10	0,393	3,503

Continuação da Tabela 7 - Resultados experimentais

Experimentos	Variáveis de controle				Variáveis de ruídos			Respostas	
	v_c	f_z	a_e	a_p	v_b	Q	C	R_a	R_t
	[m/min]	[mm/dente]	[mm]	[mm]	[mm]	[l/min]	[%]	(μm)	(μm)
79	75	0,13	16,5	1	0,15	10	10	0,413	2,973
80	75	0,13	16,5	1	0,15	10	10	0,380	2,837
81	75	0,13	16,5	1	0,15	10	10	0,340	2,640
82	75	0,13	16,5	1	0,15	10	10	0,397	3,136

Fonte: Autoria própria

Em relação aos valores encontrados para as rugosidades R_a e R_t , observa-se que os valores variam de 0,243 a 1,097 μm para R_a , e de 1,800 até 7,058 μm para a rugosidade R_t . Os valores medidos para a rugosidade R_a tornam possível sua aplicação em diversas áreas, tais como em mancais, cones de tubos sincronizadores de caixas de câmbio, guias de mesas de máquinas ferramenta, rotores de turbina e superfícies de medição de calibre. Essa informação é fundamental para garantir a adequada funcionalidade e desempenho desses componentes e sistemas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. MODELAGEM MATEMÁTICA DAS RESPOSTAS

A partir dos resultados dos experimentos apresentados na Tabela 7, foi possível o estabelecimento de relações matemáticas entre as respostas em análise e os parâmetros do processo. Um modelo de superfície de resposta de segunda ordem foi utilizado para representar a relação aproximada entre as respostas de interesse R_a e R_t e as variáveis de entrada e de ruídos. Dessa forma, considerando o processo abordado neste trabalho onde são estudados os efeitos de quatro parâmetros de entrada e três parâmetros de ruídos, pode-se escrever a Equação 17 a seguir:

$$\begin{aligned}
 R_a, R_t(x, z) = & \beta_0 + \beta_1 f_z + \beta_2 a_p + \beta_3 v_c + \beta_4 a_e + \beta_{11} f_z^2 + \beta_{22} a_p^2 + \beta_{33} v_c^2 \\
 & + \beta_{44} a_e^2 + \beta_{12} f_z a_p + \beta_{13} f_z v_c + \beta_{14} f_z a_e + \beta_{23} a_p v_c + \beta_{24} a_p a_e \\
 & + \beta_{34} v_c a_e + \gamma_1 v_b + \gamma_2 C + \gamma_3 Q + \delta_{11} f_z v_b + \delta_{12} f_z C + \delta_{13} f_z Q \\
 & + \delta_{21} a_p v_b + \delta_{22} a_p + \delta_{23} a_p Q + \delta_{31} v_c v_b + \delta_{32} v_c C + \delta_{33} v_c Q \\
 & + \delta_{41} a_e v_b + \delta_{42} a_e C + \delta_{43} a_e Q
 \end{aligned} \quad (17)$$

Onde:

R_a e R_t – Resposta de interesse

$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}, \gamma_i, \delta_{ij}$ – Coeficientes a serem estimados ($i = 1, 2, 3, 4 \ i < j$)

f_z – Avanço por dente

a_p – Profundidade de usinagem

v_c – Velocidade de corte

a_e – Penetração de trabalho

v_b – Desgaste de flanco

Q – Vazão de fluido

C – Concentração do fluido

As variáveis de controle v_c , f_z , a_p e a_e foram escritas em sua forma codificada. Os coeficientes do modelo foram estimados pelo Método dos Mínimos Quadrados (OLS) utilizando o *software* Minitab® (2021). Os coeficientes estimados para os modelos podem ser verificados nas Tabelas 8 e 9 cujas interações se apresentam em negrito.

Tabela 8 - Coeficientes estimados para a rugosidade R_a

R_a					
Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	0,4256	0,0135	31,54	0,000	
v_c	0,01597	0,00591	2,70	0,009	1
f_z	0,05574	0,00591	9,43	0,000	1
a_e	0,00198	0,00591	0,34	0,738	1
a_p	0,00826	0,00591	1,40	0,168	1
v_b	0,13823	0,00661	20,93	0,000	1
Q	-0,05342	0,00661	-8,09	0,000	1
C	0,00452	0,00661	0,68	0,497	1
$v_c \times v_c$	0,04525	0,00511	8,86	0,000	1,06
$f_z \times f_z$	0,06038	0,00511	11,82	0,000	1,06
$a_e \times a_e$	0,06725	0,00511	13,17	0,000	1,06
$a_p \times a_p$	0,04563	0,00511	8,93	0,000	1,06
$v_c \times f_z$	0,08814	0,00661	13,34	0,000	1
$v_c \times a_e$	-0,00517	0,00661	-0,78	0,437	1
$v_c \times a_p$	-0,01127	0,00661	-1,71	0,094	1
$v_c \times v_b$	0,03502	0,00661	5,30	0,000	1
$v_c \times Q$	0,00005	0,00661	0,01	0,994	1
$v_c \times C$	0,00117	0,00661	0,18	0,860	1
$f_z \times a_e$	0,00542	0,00661	0,82	0,415	1
$f_z \times a_p$	0,01033	0,00661	1,56	0,124	1
$f_z \times v_b$	-0,07577	0,00661	-11,47	0,000	1
$f_z \times Q$	-0,00805	0,00661	-1,22	0,229	1
$f_z \times C$	0,00295	0,00661	0,45	0,657	1
$a_e \times a_p$	-0,00548	0,00661	-0,83	0,410	1
$a_e \times v_b$	0,00492	0,00661	0,75	0,460	1
$a_e \times Q$	-0,00173	0,00661	-0,26	0,794	1
$a_e \times C$	-0,00555	0,00661	-0,84	0,405	1
$a_p \times v_b$	0,01014	0,00661	1,54	0,131	1
$a_p \times Q$	0,00392	0,00661	0,59	0,555	1
$a_p \times C$	-0,00545	0,00661	-0,83	0,413	1

Fonte: Minitab® (2021)

Tabela 9 - Coeficientes estimados para a rugosidade R_t

R_t					
Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	3,0457	0,0942	32,32	0,000	
v_c	0,0385	0,0413	0,93	0,355	1
f_z	0,2939	0,0413	7,12	0,000	1
a_e	-0,0215	0,0413	-0,52	0,605	1
a_p	0,1234	0,0413	2,99	0,004	1
v_b	0,715	0,0461	15,50	0,000	1
Q	-0,1067	0,0461	-2,31	0,025	1
C	-0,0861	0,0461	-1,87	0,068	1
$v_c \times v_c$	0,2902	0,0357	8,14	0,000	1,06
$f_z \times f_z$	0,3838	0,0357	10,76	0,000	1,06
$a_e \times a_e$	0,3259	0,0357	9,14	0,000	1,06
$a_p \times a_p$	0,2614	0,0357	7,33	0,000	1,06
$v_c \times f_z$	0,4954	0,0461	10,74	0,000	1
$v_c \times a_e$	-0,0688	0,0461	-1,49	0,142	1
$v_c \times a_p$	-0,0275	0,0461	-0,60	0,554	1
$v_c \times v_b$	0,2749	0,0461	5,96	0,000	1
$v_c \times Q$	0,0009	0,0461	0,02	0,985	1
$v_c \times C$	-0,0527	0,0461	-1,14	0,259	1
$f_z \times a_e$	-0,0219	0,0461	-0,48	0,636	1
$f_z \times a_p$	0,0867	0,0461	1,88	0,066	1
$f_z \times v_b$	-0,2908	0,0461	-6,30	0,000	1
$f_z \times Q$	0,1222	0,0461	2,65	0,011	1
$f_z \times C$	0,0069	0,0461	0,15	0,882	1
$a_e \times a_p$	0,0477	0,0461	1,04	0,305	1
$a_e \times v_b$	0,1158	0,0461	2,51	0,015	1
$a_e \times Q$	-0,0047	0,0461	-0,10	0,918	1
$a_e \times C$	-0,0248	0,0461	-0,54	0,593	1
$a_p \times v_b$	0,1205	0,0461	2,61	0,012	1
$a_p \times Q$	0,0054	0,0461	0,12	0,908	1
$a_p \times C$	-0,0647	0,0461	-1,40	0,167	1

Fonte: Minitab® (2021)

Pode ser observado que existem diversos termos significativos (valor P < 5%) que proporcionam ajuste elevado para os modelos (R^2 (aj.)) correspondentes a 93,91% para R_a e 89,89% para R_t , conforme Tabela 10. De acordo com Montgomery e Runger (2021), pode-se considerar que o modelo estatístico representa bem o comportamento das variáveis de resposta quando o coeficiente de determinação (R^2) é superior a 70%.

Tabela 10 - Sumários dos modelos

R_a			
S	R ²	R ² (aj.)	R ² (pred.)
0,052841	96,09%	93,91%	89,93%

R_t			
S	R ²	R ² (aj.)	R ² (pred.)
0,369048	93,51%	89,89%	83,30%

Fonte: Autoria própria

4.2. ADEQUAÇÃO E AJUSTE DOS MODELOS

A adequação dos modelos foi avaliada por meio da Análise de Variância (ANOVA) realizada utilizando o *software* Minitab. Os resultados desta análise estão apresentados nas Tabelas 11 e 12, evidenciando que os modelos desenvolvidos são apropriados. É notável que a interação com dois fatores dos modelos em questão exibe Valor P abaixo de 5% de significância tanto para R_a quanto para R_t . Além disso, os resultados da ANOVA indicam que os modelos não demonstraram falta de ajuste, uma vez que os valores de R² (aj.) foram consideravelmente elevados, atingindo 93,91% para R_a e 89,89% para R_t .

Tabela 11 - Análise de Variância para a rugosidade R_a

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	29	3,56649	0,12298	44,05	0,000
Linear	7	1,68163	0,24023	86,04	0,000
Quadrado	4	0,90336	0,22584	80,88	0,000
Interação com 2 Fatores	18	0,9815	0,05453	19,53	0,000
Falta de ajuste	43	0,12378	0,00288	1,21	0,404
Erro puro	9	0,02141	0,00238		
Total	81	3,71168			

Fonte: Minitab® (2021)

Tabela 12 - Análise de Variância para a rugosidade R_t

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	29	102,034	3,5184	25,83	0,000
Linear	7	42,208	6,0297	44,27	0,000
Quadrado	4	29,625	7,4063	54,38	0,000
Interação com 2 Fatores	18	30,201	1,6778	12,32	0,000
Falta de ajuste	43	5,855	0,1362	1,00	0,546
Erro puro	9	1,227	0,1363		
Total	81	109,117			

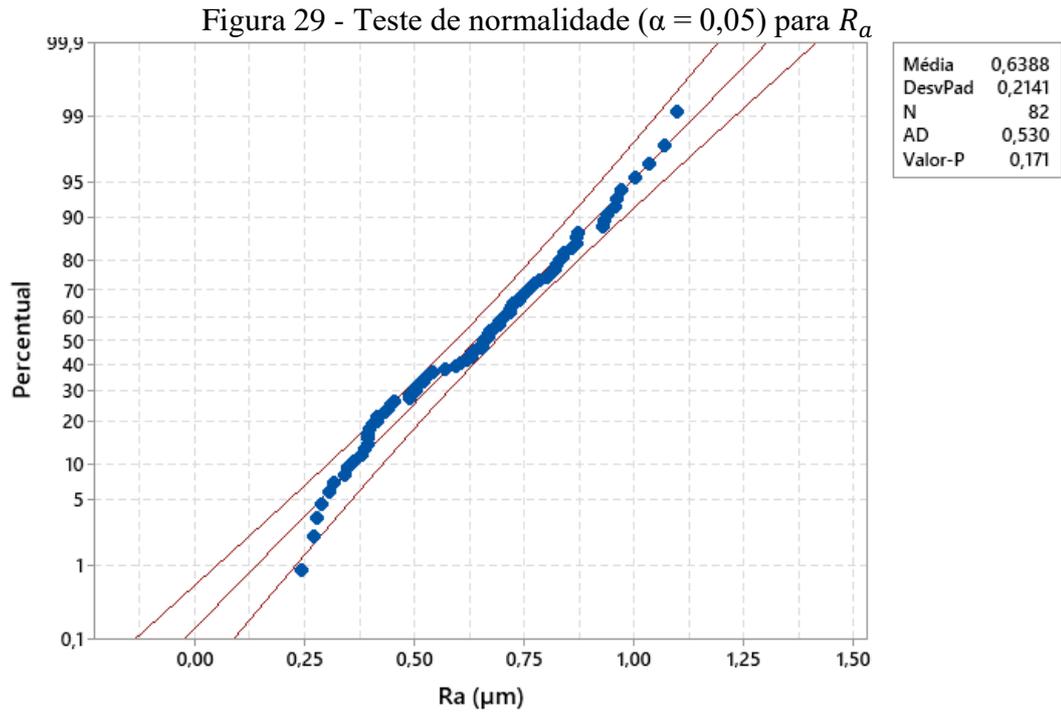
Fonte: Minitab® (2021)

Analisando os efeitos das variáveis lineares para a resposta de rugosidade R_a , Tabela 8, a velocidade de corte (v_c), o avanço por dente (f_z), o desgaste de flanco (v_b) e a vazão do fluido (Q) apresentaram influência estatisticamente significativa. Pode ser observado também que todos os termos quadráticos são significativos. As interações foram significativas apenas em $v_c \times f_z$, $v_c \times v_b$ e $f_z \times v_b$.

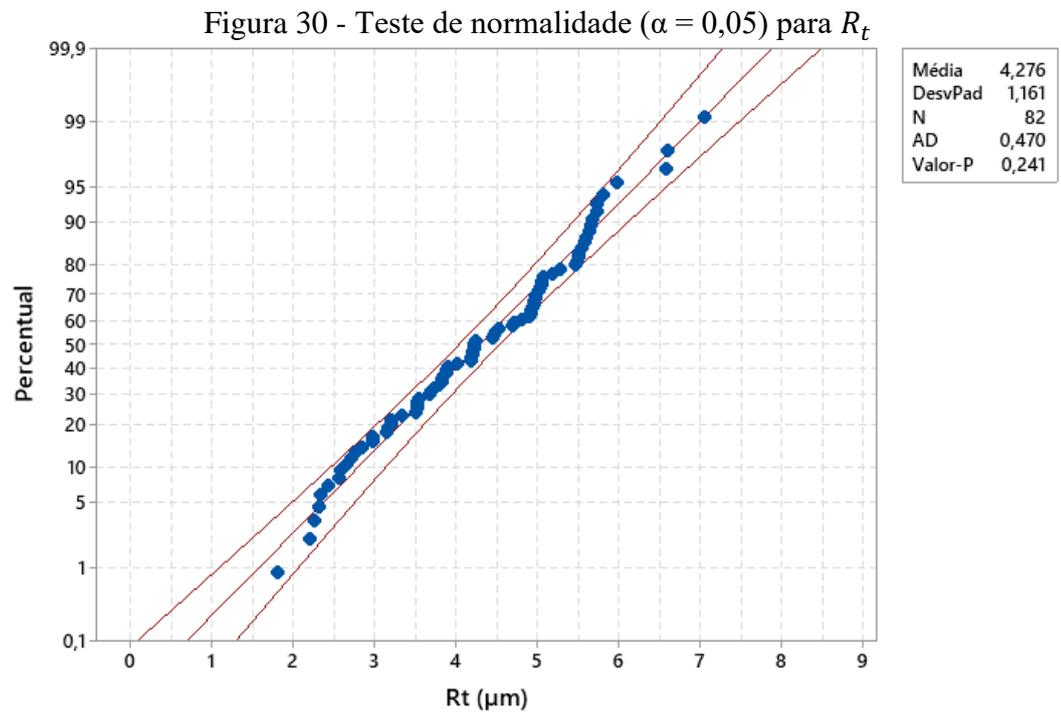
Para a resposta de rugosidade R_t , Tabela 9, as variáveis que apresentaram influência estatística foram o avanço por dente (f_z), a profundidade de usinagem (a_p), o desgaste de flanco (v_b) e a vazão do fluido (Q). Da mesma forma que, todos os termos quadráticos são significativos. As interações significativas foram: $v_c \times f_z$, $v_c \times v_b$, $f_z \times v_b$, $f_z \times Q$, $a_e \times v_b$ e $a_p \times v_b$.

Considerando valor $P > 5\%$ para o *Lack of Fit*, o teste de falta de ajuste mostra que os modelos se adequam bem aos dados coletados no processo. Os coeficientes de ajustes R^2 (aj.) foram superiores a 80%, ou seja, os modelos estimados para R_a e R_t apresentam boa capacidade de realizar previsões, além de apresentar elevada explicação de variabilidade dos dados, podendo ser comparados a valores encontrados em simulações computacionais.

Os gráficos de probabilidade normal dos resíduos para as respostas foram plotados conforme Figuras 29 e 30, onde verifica-se que os resíduos geralmente estão próximos à uma linha reta, o que indica que os erros são distribuídos normalmente. Obteve-se como resultado valor P maiores que 5% de significância e coeficientes de Anderson-Darling (AD) inferiores a 1,0, indicando que os resíduos são normais para todas as respostas.



Fonte: Minitab® (2021)



Fonte: Minitab® (2021)

Após a construção do modelo para o arranjo combinado, as equações de média e variância para os parâmetros de rugosidade da rugosidade R_a e R_t conforme Equações 18 a 21.

$$\begin{aligned} \mu(R_a)(x, z) = & 0,42560 + 0,01597v_c + 0,05574f_z + 0,00198a_e + 0,00826a_p \quad (18) \\ & + 0,04525v_c^2 + 0,06038f_z^2 + 0,06725a_e^2 + 0,0563a_p^2 \\ & + 0,08814v_c f_z - 0,00517v_c a_e - 0,01127v_c a_p + 0,00542f_z a_e \\ & + 0,01033f_z a_p - 0,00548a_e a_p \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma^2(R_a) = & 0,02477 + 0,00969v_c - 0,02006f_z + 0,00149a_e + 0,00234a_p \quad (19) \\ & + 0,00123v_c^2 + 0,00581f_z^2 + 0,00006a_e^2 + 0,00015a_p^2 \\ & - 0,00530v_c f_z + 0,00033v_c a_e + 0,00070v_c a_p - 0,00075f_z a_e \\ & - 0,00163f_z a_p + 0,00015a_e a_p \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu(R_t)(x, z) = & 3,0457 + 0,03850v_c + 0,29390f_z - 0,02150a_e + 0,12340a_p \quad (20) \\ & + 0,29020v_c^2 + 0,38380f_z^2 + 0,32590a_e^2 + 0,26140a_p^2 \\ & + 0,49540v_c f_z - 0,06880v_c a_e - 0,02750v_c a_p - 0,02190f_z a_e \\ & + 0,08670f_z a_p + 0,04770a_e a_p \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma^2(R_t) = & 0,66622 + 0,40199v_c - 0,44313f_z + 0,17089a_e + 0,18230a_p \quad (21) \\ & + 0,07835v_c^2 + 0,09957f_z^2 + 0,01405a_e^2 + 0,01874a_p^2 \\ & - 0,16039v_c f_z + 0,06627v_c a_e + 0,07308v_c a_p - 0,06884f_z a_e \\ & - 0,06966f_z a_p + 0,03107a_e a_p \end{aligned}$$

O controle estatístico de processos busca “manter” o processo em faixas de controle denominadas limites de controle. A média do processo não coincide com a dimensão nominal especificada pelo projeto. Para tentar se manter e trabalhar com as dimensões nominais, devem-se realizar experimentos com as variáveis envolvidas no processo com objetivo de tornar o projeto robusto, sendo mais robusto quanto menos for impactado por fatores de ruído interno ou externo (BRITO, 2012).

4.3. ANÁLISE DOS EFEITOS DAS INTERAÇÕES

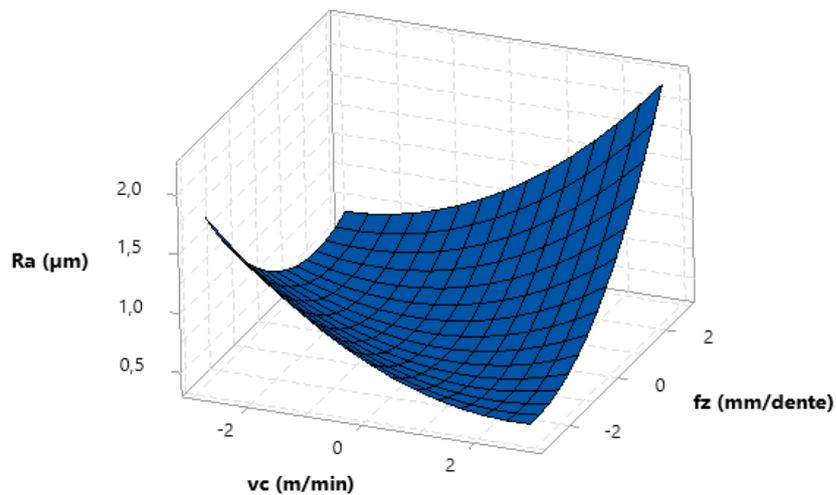
Utilizando-se o *software* Minitab foram construídas as superfícies de resposta relacionando-se os parâmetros em estudo com as respostas R_a e R_t .

As análises de regressão apontam que as interações entre os parâmetros se comportam como fatores significativos, o que significa que efeitos conjuntos desses parâmetros influenciam nos resultados do processo de fresamento de topo para os parâmetros de rugosidade R_a e R_t . Dessa forma, a análise das interações foi realizada através de superfícies de resposta para as interações consideradas mais importantes.

Observa-se na Figura 31 que a interação entre variáveis de entrada é significativa. À medida em que a velocidade de corte (v_c) juntamente com o avanço por dente (f_z), a rugosidade R_a é aumentada consideravelmente.

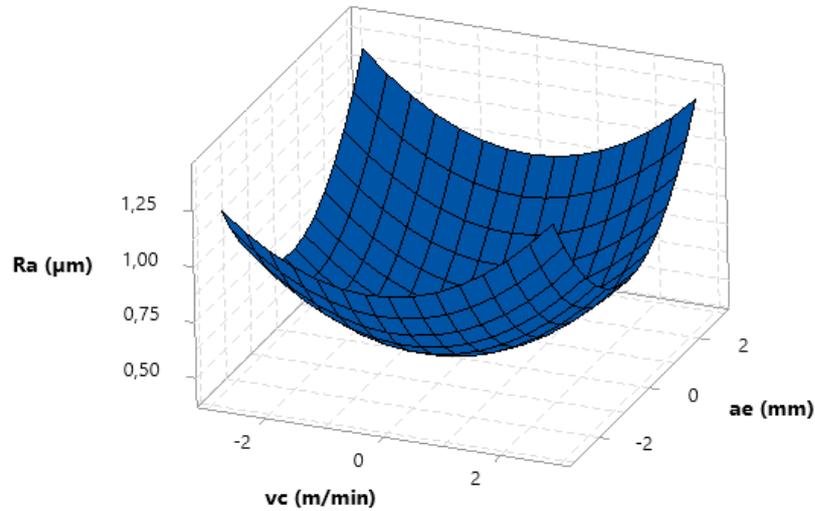
Análise semelhante pode ser feita observando a Figura 32 onde pode ser notado aumento relevante da rugosidade R_a quando os valores da velocidade de corte (v_c) e penetração de trabalho (a_e).

Figura 31 - Efeito da interação entre velocidade de corte e avanço por dente sobre a rugosidade R_a (μm)



Fonte: Autoria própria

Figura 32 - Efeito da interação entre velocidade de corte e penetração de trabalho sobre a rugosidade R_a (μm)

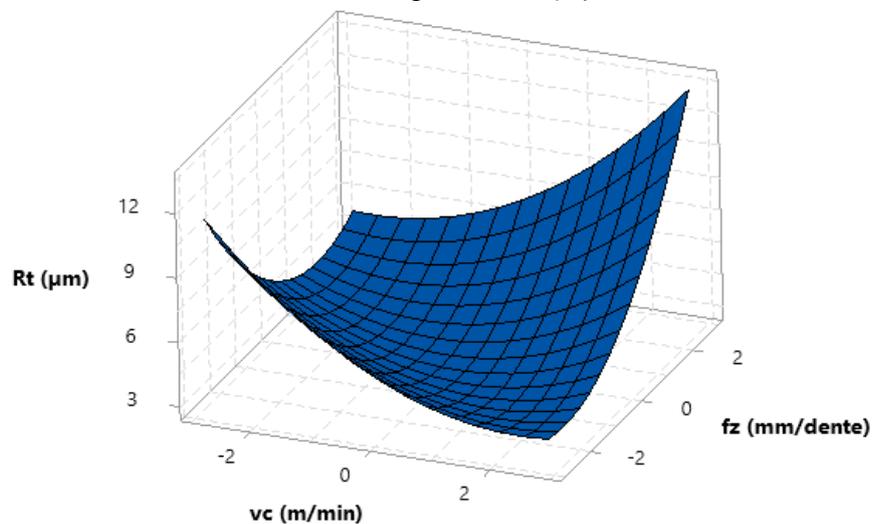


Fonte: Autoria própria

A variação de R_a em função dos parâmetros de entrada velocidade de corte (v_c), avanço por dente (f_z) e penetração de trabalho (a_e) com diferentes comportamentos das superfícies. Tais diferenças são justificadas em função do aumento da velocidade de corte, avanço por dente e penetração de trabalho, provocando choques da ferramenta de corte contra o corpo de prova.

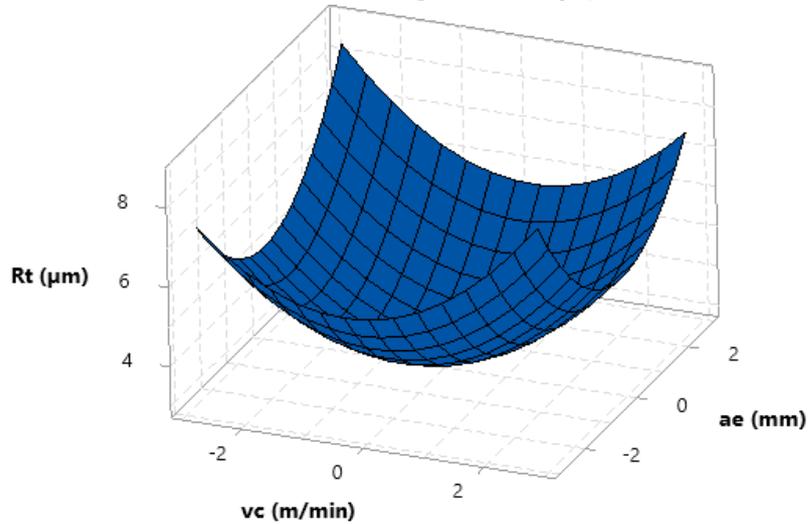
Observam-se outras interações significativas sobre o fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 e que estão representadas nas Figuras 33 e 34 sobre a rugosidade R_t .

Figura 33 - Efeito da interação entre velocidade de corte e avanço por dente sobre a rugosidade R_t (μm)



Fonte: Autoria própria

Figura 34 - Efeito da interação entre velocidade de corte e penetração de trabalho sobre a rugosidade R_t (μm)

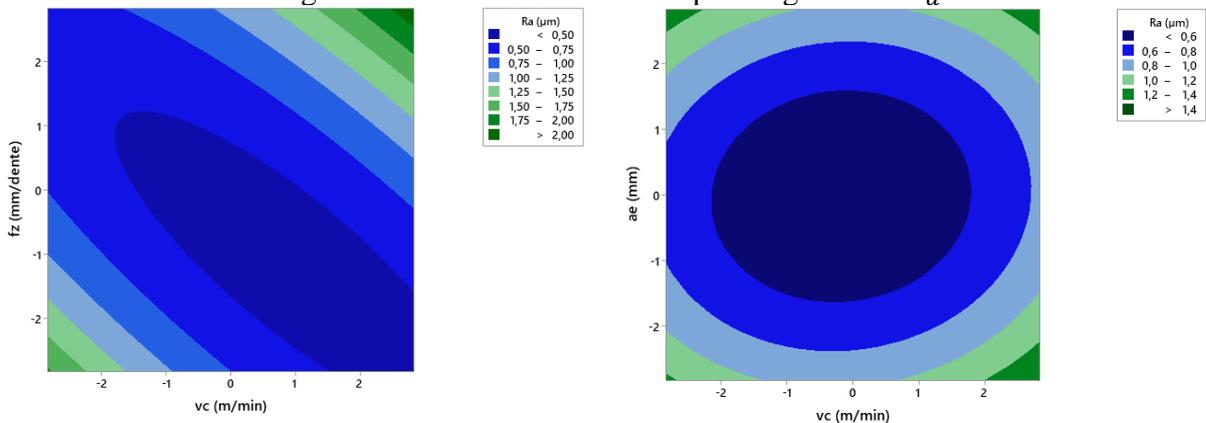


Fonte: Autoria própria

Pode ser observado que o comportamento da rugosidade R_t é semelhante ao comportamento da rugosidade R_a , entretanto nem toda vez que o valor da rugosidade R_a for baixo significa que o valor a rugosidade R_t também seja. Tal afirmativa baseia-se no fato de que os valores de R_a são médios e para R_t são medidos os valores dos maiores picos e vales mais profundos.

As Figuras 35 (A, B) e 36 (A, B) apresentam os gráficos de contorno para as respostas R_a e R_t e seus comportamentos, separando-as em diferentes faixas para diversos valores de velocidade de corte (v_c), avanço por dente (f_z) e penetração de trabalho (a_e).

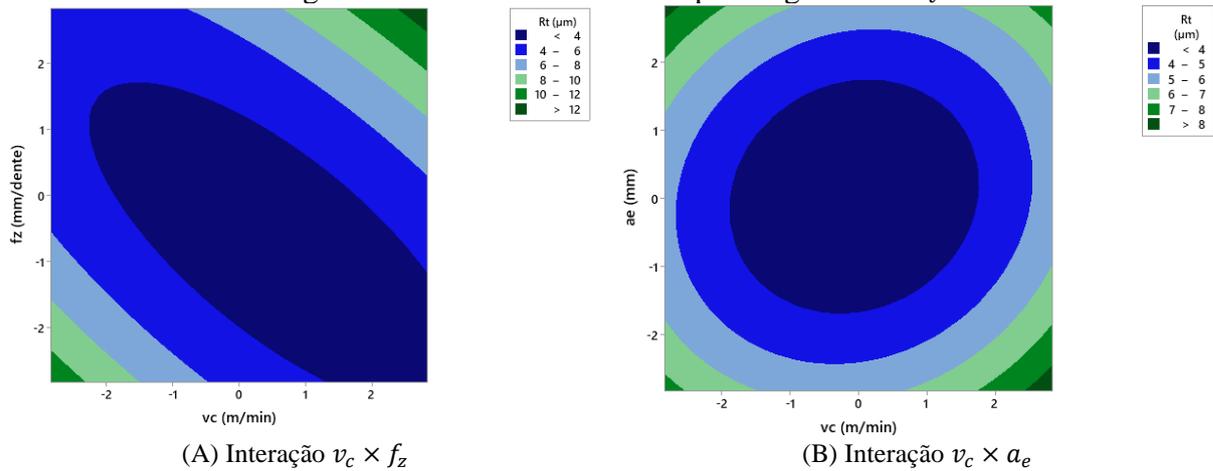
Figura 35 - Gráfico de contorno para rugosidade R_a



(A) Interação $v_c \times f_z$

(B) Interação $v_c \times a_e$

Fonte: Autoria própria

Figura 36 - Gráfico de contorno para rugosidade R_t 

4.4. OTIMIZAÇÃO DAS RESPOSTAS R_a e R_t

A análise desenvolvida até o presente momento já apresenta grande relevância para o processo analisado, já que, a partir da modelagem matemática realizada na fase anterior, muitas informações importantes passam a ser conhecidas. Entre essas informações, o conhecimento da influência dos parâmetros sobre as respostas e a identificação das variáveis significativas são fatores decisivos para um controle adequado e uma gestão eficiente do processo de fresamento. Além disso, tendo-se em mãos modelos confiáveis, é possível fazer com que os resultados sejam otimizados. Nesse contexto, desenvolve-se nesta fase a otimização do processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205, empregando o Erro Quadrático Médio (EQM).

Uma vez que as equações de média e variância estão estabelecidas, é o momento de otimizar o processo através da minimização do Erro Quadrático Médio (EQM). Para a construção da formulação apresentada na Equação 14, faz-se necessário a definição do valor alvo para a rugosidade. Tal valor foi baseado na otimização individual do valor médio das rugosidades R_a e R_t minimizando a Equação 17. Dessa forma, adotou-se os valores de alvos para R_a de $0,4534 \mu m$ e para R_t , de $3,2643 \mu m$.

A formulação do problema foi escrita combinando as Equações 22 e 23 analiticamente em uma única função objetivo, dessa forma pode-se utilizar uma soma ponderada tal como a Equação 24.

$$\text{Min. EQM } (R_a) = [\mu(R_a) - 0,4532] + \sigma^2(R_a) \quad (22)$$

$$\text{Sujeito a: } f_z^2 + a_p^2 + v_c^2 + a_e^2 \leq 4$$

$$\text{Min. } EQM(R_t) = [\mu(R_t) - 3,2593] + \sigma^2(R_t) \quad (23)$$

$$\text{Sujeito a: } f_z^2 + a_p^2 + v_c^2 + a_e^2 \leq 4$$

$$\text{Min } EQM_{total} = w_1\{[\mu R_a - TR_a]^2 + \sigma^2 R_a\} + w_2\{[\mu R_t - TR_t]^2 + \sigma^2 R_t\} \quad (24)$$

Onde:

$EQM(R_a, R_t)$ – Erro quadrático médio para as rugosidades R_a e R_t

$\mu(R_a, R_t)$ – Modelo para a média, descrito nas Equações 18 e 20

$\sigma^2(y)(R_a, R_t)$ – Modelo para a variância, descrito nas Equações 19 e 21

Para que fossem determinados os parâmetros ótimos para o fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 foi utilizado o algoritmo do Erro Quadrático Médio (EQM). Para tanto, foi utilizado o suplemento Solver disponível no MS Excel[®] logo após a devida programação em uma planilha do programa. A Tabela 13 apresenta os valores ótimos individuais para valores codificados, para um peso de 0,50 para rugosidade R_a e 0,50 para a rugosidade R_t .

Tabela 13 - Parâmetros robustos ótimos para o fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205

	R_a	R_t	$Z(x)$	EQM (R_a)(x)	0,0087	
Constante	0,4256	3,0457	1,0000	EQM (R_t)(x)	0,1510	
v_c	0,0160	0,0385	0,5609	Pesos		
f_z	0,0557	0,2939	-0,5208	w_1	w_2	
a_e	0,0020	-0,0215	-0,9210	0,50	0,50	
a_p	0,0083	0,1234	-0,1327	EQM total de (x)	0,0798	
$v_c \times v_c$	0,0453	0,2902	0,8482			
$f_z \times f_z$	0,0604	0,3838	0,3146			
$a_e \times a_e$	0,0673	0,3259	0,0176	(-1)	(+1)	
$a_p \times a_p$	0,0456	0,2614	0,2713	v_c	60,00	90,00
$v_c \times f_z$	0,0881	0,4954	-0,5166	f_z	0,10	0,16
$v_c \times a_e$	-0,0052	-0,0688	0,1222	a_e	0,10	18,00
$v_c \times a_p$	-0,0113	-0,0275	0,4797	a_p	0,10	1,20
$f_z \times a_e$	0,0054	-0,0219	-0,0744			
$f_z \times a_p$	0,0103	0,0867	-0,2921			
$a_e \times a_p$	-0,0055	0,0477	0,0691			
Ótimo Individual	0,4532	3,2593	$f(x)$			
Alvos	0,3992	2,9420	Alvos			
	$G(x):$	1,452	2,8284			
	R_a			R_t		
Termo	$\partial R_a / z_1$	$\partial R_a / z_2$	$\partial R_a / z_3$	$\partial R_t / z_1$	$\partial R_t / z_2$	$\partial R_t / z_3$
b0	0,1382	-0,0534	0,0045	0,7150	-0,1067	-0,0861
f_z	0,0350	0,0001	0,0012	0,2749	0,0009	-0,0527
a_p	-0,0758	-0,0081	0,0030	-0,2908	0,1222	0,0069
v_c	0,0049	-0,0017	-0,0056	0,1158	-0,0047	-0,0248
a_e	0,0101	0,0039	-0,0055	0,1205	0,0054	-0,0647
$[\partial y(x,z) / \partial z_i]$	0,05754	-0,0492	-0,0018	0,22059	0,00329	-0,0411
$[\partial y(x,z) / \partial z_i]^2$	0,00331	0,00243	0,00000	0,04866	0,00001	0,00170
$Var [y(x,z)]$	0,0057			0,0504		

Fonte: Autoria Própria

Observa-se que o parâmetro robusto indicado para o fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 caracteriza o ponto ótimo como uma condição satisfatória para o processo, na medida em que o resultado esperado para as respostas de rugosidade R_a e R_t mostram-se como valores razoavelmente baixos em relação às medidas que foram observadas nos experimentos. Os valores de variabilidade de $0,0057 \mu m$ para R_a e $0,0504 \mu m$ para R_t , são considerados satisfatórios comparando com as medidas experimentais.

Para alcançar resultados ótimos em diferentes cenários, é essencial realizar ajustes no processo. Isso pode ser obtido através do estabelecimento de ponderações iguais para a média e variância de R_a e R_t , o que leva à obtenção de um conjunto de parâmetros robustos e otimizados. Com esse conjunto de parâmetros, o processo pode ser reconfigurado de forma a atingir os melhores resultados para as variáveis de resposta em diferentes cenários. Essa abordagem permite uma adaptação eficiente e eficaz do processo, de acordo com as necessidades específicas de cada situação.

Considerando a discussão realizada no capítulo 2 de revisão da literatura, os modelos de média e variância desenvolvidos através de um arranjo combinado são escritos como função somente das variáveis de controle, embora os ruídos sejam testados em diferentes níveis durante a realização dos experimentos. Dado que a derivação da equação de variância traz consigo os efeitos causados pelas variáveis de ruídos, faz-se necessário o ajuste das variáveis controláveis para que seja obtido o mínimo de variabilidade, garantindo a robustez do processo em relação a esses efeitos. A distribuição de pesos para os parâmetros de rugosidades R_a e R_t , conforme Tabela 14.

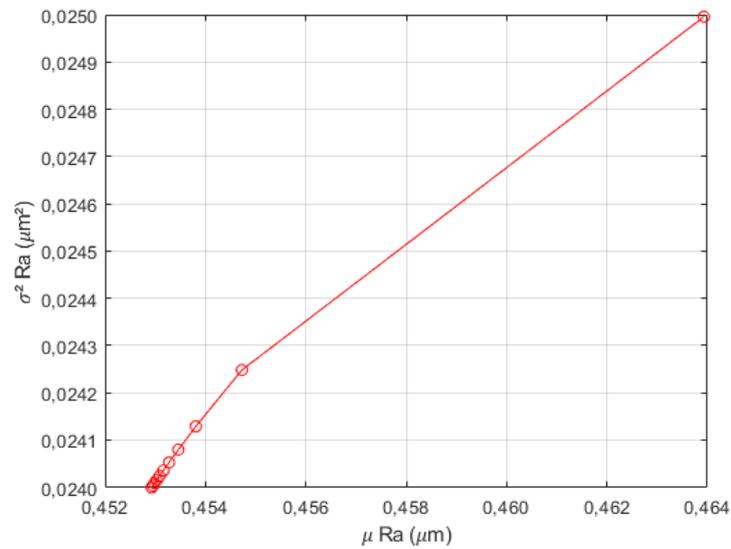
Tabela 14 - Parâmetros otimizados para R_a e R_t

Pesos		Variáveis codificadas				R_a	R_t	$EQM R_a$	$EQM R_t$
w_1	w_2	v_c	f_z	α_e	α_p				
0,00	1,00	-0,9150	0,5536	-0,1334	-0,5250	0,45293	3,25689	0,0240	0,5017
0,10	0,90	-0,9157	0,5544	-0,1333	-0,5245	0,45295	3,25717	0,0240	0,5018
0,20	0,80	-0,9165	0,5555	-0,1332	-0,5239	0,45299	3,25751	0,0240	0,5018
0,30	0,70	-0,9176	0,5568	-0,1331	-0,5232	0,45303	3,25794	0,0240	0,5019
0,40	0,60	-0,9190	0,5585	-0,1329	-0,5222	0,45309	3,25851	0,0240	0,5020
0,50	0,50	-0,9210	0,5609	-0,1327	-0,5208	0,45316	3,25930	0,0240	0,5021
0,60	0,40	-0,9238	0,5644	-0,1324	-0,5189	0,45328	3,26047	0,0241	0,5023
0,70	0,30	-0,9284	0,5699	-0,1319	-0,5158	0,45346	3,26235	0,0241	0,5025
0,80	0,20	-0,9372	0,5800	-0,1312	-0,5102	0,45381	3,26591	0,0241	0,5029
0,90	0,10	-0,9597	0,6048	-0,1305	-0,4968	0,45473	3,28752	0,0242	0,5039
1,00	0,00	-1,1829	0,7781	-0,1597	-0,4337	0,46393	3,36837	0,0250	0,5044

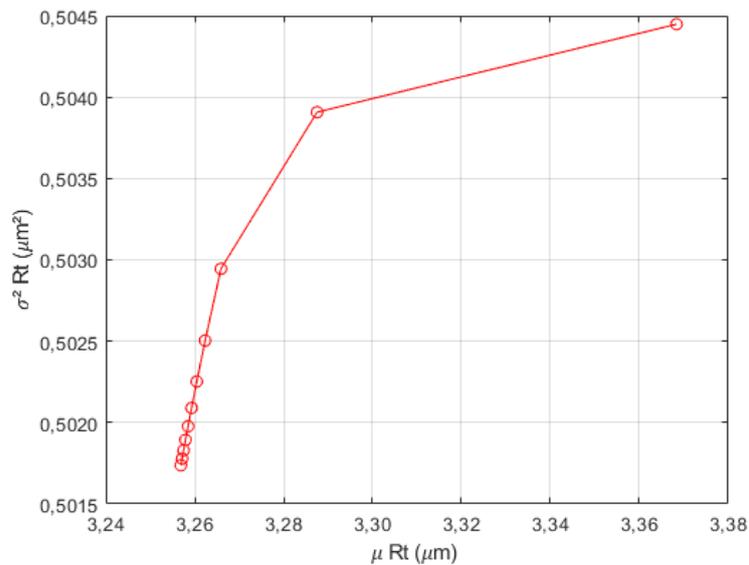
Fonte: autoria própria

Utilizando o *software* MATLAB, foram inseridos os valores da Tabela 14, apresentando os resultados gerados a partir da otimização com diferentes pesos atribuídos aos parâmetros das variáveis de resposta, ou seja, as rugosidades R_a e R_t , além do Erro Quadrático Médio (EQM R_a e EQM R_t). Com base nesses dados, foi possível gerar as fronteiras de Pareto representadas nas Figuras 37 (A, B e C).

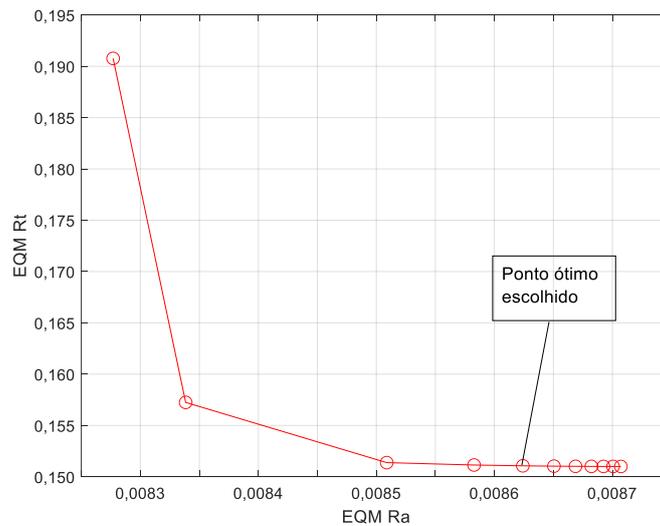
Figura 37 - Fronteiras de Pareto: (A) média e variância R_a , (B) média e variância R_t ; (C) para o par EQM R_a , EQM R_t



(A)



(B)



(C)

Fonte: autoria própria

Nota-se pelos gráficos das fronteiras de Pareto que embora as rugosidades R_a e R_t estejam relacionadas, não são otimizadas utilizando o mesmo setup de máquina em função do fato de que as configurações que otimizam a rugosidade R_a são diferentes daquelas que otimizam R_t . Entretanto, sob a ótica do processo de usinagem, ambas rugosidades têm grande importância considerando suas aplicações individuais.

4.5. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

O objetivo dos experimentos de confirmação é comparar os resultados reais com os resultados obtidos para a condição otimizada. Assim, foi empregada a combinação ótima dos parâmetros indicada através do Erro Quadrático Médio (EQM), considerando as condições de parâmetro de máquina fixo. Os parâmetros ótimos foram inseridos no painel de comando do centro de usinagem CNC, conforme Tabela 15.

Tabela 15 - Parâmetros robustos ótimos para o fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205

	Variáveis de controle				R_a	R_t	σ^2 (R_a)	σ^2 (R_t)
	v_c	f_z	a_e	a_p				
Resultado ótimo	61,19	0,15	16,30	0,90	0,4531	3,259	0,0240	0,5021
Unidade	<i>m/min</i>	<i>mm/dente</i>	<i>Mm</i>	<i>mm</i>	μm	μm	μm^2	μm^2

Fonte: autoria própria

As condições ótimas de corte foram ensaiadas variando as condições de uso da ferramenta, concentração e vazão do fluido. Para cada passada houve medições das rugosidades R_a e R_t em três pontos para cada condição de variável de ruído (v_b , C e Q).

O ponto central da otimização de projeto robusto consiste em identificar uma configuração de fatores controláveis que não sofra interferência de fatores incontrolláveis, os ruídos. A fim de testar essa afirmativa no processo estudado, foi utilizado um projeto L9 de Taguchi para avaliar o comportamento da configuração ótima em um cenário entre variáveis de controle e ruídos.

Foi construído projeto L9 de Taguchi para confirmação dos experimentos associados aos pesos $w_1 = 0,50$ e $w_2 = 0,50$ para os ensaios utilizando ferramentas novas, desgastadas com 0,15mm e 0,30mm, conforme Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados dos experimentos de confirmação

v_b	C	Q	R_a (Real)	R_t (Real)
0,00	0	0	0,431	3,544
0,00	10	10	0,427	3,386
0,00	20	20	0,474	3,281
0,15	0	10	0,456	3,238
0,15	10	20	0,441	3,470
0,15	20	0	0,482	3,577
0,30	0	20	0,451	3,310
0,30	10	0	0,470	3,518
0,30	20	10	0,513	3,265
Média			0,461	3,399
Valor previsto			0,454	3,267
Erro			1,61%	4,10%

Fonte: autoria própria

Utilizando o *software* Minitab para o projeto L9 de Taguchi foi verificado pela Análise de Variância (ANOVA), conforme Tabelas 17 e 18, que os resultados das análises mostraram que todos os modelos desenvolvidos são adequados uma vez que apresentam valor $P > 5\%$ para R_a e R_t , o que significa que as variáveis de ruído não influenciam no processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205.

Tabela 17 - Análise de variância para experimento de confirmação de R_a

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
v_b	2,00	0,001738	0,000869	6,38	0,13500
C	2,00	0,003814	0,001907	14,01	0,06700
Q	2,00	0,000151	0,000075	0,55	0,64300
Erro	2,00	0,000272	0,000136		
Total	8,00	0,005974			

Fonte: autoria própria

Tabela 18 - Análise de variância para experimento de confirmação de R_t

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
v_b	2,00	0,006288	0,003144	0,50	0,66800
C	2,00	0,015961	0,007980	1,26	0,44200
Q	2,00	0,102976	0,051488	8,13	0,10900
Erro	2,00	0,012659	0,006329		
Total	8,00	0,137883			

Fonte: autoria própria

Após execução dos experimentos de confirmação, é possível observar que os resultados ótimos reais se aproximam dos resultados teóricos uma vez que a maior diferença apresentada foi de 1,61% para a rugosidade R_a e 4,10% para R_t . Assim, na medida em que os valores reais se mostram condizentes com os valores calculados, ficam validados os resultados obtidos para o processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205. Essa validação pode ser estendida para os modelos matemáticos desenvolvidos, levando em conta que eles apresentam baixos erros quanto à previsão dos parâmetros de rugosidade R_a e R_t .

4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram apresentados resultados para os parâmetros de rugosidade R_a e R_t na superfície fresada do aço inoxidável duplex UNS S32205, com insertos intercambiáveis de metal duro com dupla camada de nitreto de titânio (TiN) e nitreto de titânio alumínio (TiAlN). Assim, a partir da discussão dos conceitos que foram relacionados ao fresamento e à estatística que é a ferramenta aliada ao processo, entre as aplicações da usinagem por fresamento, o trabalho dedicou-se a relacionar o desgaste dos insertos e à aplicação do fluido de corte, com ênfase na qualidade da superfície usinada. Dessa forma, os parâmetros de

usinagem do aço inoxidável duplex UNS S32205 foram definidos usando insertos com arestas novas e desgastadas. O estudo e análise das pesquisas publicadas anteriormente relacionadas ao processo de usinagem por fresamento mostrou o crescente interesse industrial e acadêmico nos últimos anos, caracterizando-o como um tema de pesquisa de grande relevância. Foi observado nas pesquisas que empregaram fresamento, que o método de parâmetro robusto é um elemento escasso na literatura, o que é visto como uma lacuna que este trabalho se propôs a contribuir. A análise das respostas consideradas em trabalhos anteriores confirmou a importância da busca para resolver os diversos desafios impostos pelas inúmeras variáveis do processo de fresamento, independentemente da análise. Por fim, a interação entre os parâmetros foi identificada como um fator significativo, de modo que sua análise não pode ser negligenciada.

No tocante às ferramentas de análise e otimização, os conceitos que envolvem o Projeto e Análise de Experimentos (DOE) foram apresentados caracterizando-o como uma técnica de grande importância para o estudo científico dos problemas de engenharia. Dentre os projetos experimentais, foi discutido a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), que é um conjunto de técnicas indicado para otimização de problemas. Logo após, foi apresentado o Erro Quadrático Médio (EQM) como método de otimização, mostrando como que sua principal vantagem está relacionada ao fato de tratar da otimização de múltiplas respostas considerando a correlação entre elas. Ressalta-se que o EQM considera as respostas com o mesmo nível de importância. Assim, foi proposta uma estratégia que ponderou as respostas para o EQM, visando contribuir para o aprimoramento do método quanto à otimização de múltiplas respostas correlacionadas ao Projeto de Parâmetro Robusto (PPR), que é o algoritmo GRG (Gradiente Reduzido Generalizado), relacionando variáveis de controle e ruídos.

Dessa forma, as etapas necessárias para o desenvolvimento da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) e da Otimização (EQM) foram aplicadas, o que contribuiu para que resultados importantes fossem obtidos. Por fim, vale destacar que a estratégia de ponderação das respostas propostas para o EQM foi empregada com sucesso para a otimização do processo estudado. Com os parâmetros ótimos encontrados foi possível aplicar o método de Taguchi (L9) para confirmar os resultados do algoritmo com valores práticos. Os valores ótimos obtidos nos experimentos de confirmação para os parâmetros de rugosidade R_a e R_t ficaram dentro do intervalo de confiança.

5. CONCLUSÕES

5.1. CONCLUSÕES DOS ENSAIOS

O presente trabalho buscou analisar, modelar e otimizar o processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 utilizando ferramentas intercambiáveis de metal duro. As respostas avaliadas em relação as variáveis de controle e ruído foram R_a e R_t , sendo possível concluir que:

- As rugosidades R_a e R_t obtidas ficaram na faixa entre 0,243 a 1,097 μm para R_a e 1,800 e 7,058 μm para R_t ;
- Foi possível estabelecer modelos matemáticos para as características de interesse. O modelo de resposta para a rugosidade R_a apresentou elevada taxa de explicação da variabilidade dos dados onde o R^2 (aj.) foi de 93,91%. O modelo relacionado à rugosidade R_t , também apresentou elevado valor de R^2 (aj.), 89,89%;
- A análise de variância da resposta rugosidade R_a mostra que a velocidade de corte (v_c), o avanço por dente (f_z), o desgaste de flanco (v_b) e vazão de fluido (Q) foram as variáveis que mais influenciaram na rugosidade. Pode ser observado também que todos os termos quadráticos foram significativos. As interações significativas para a rugosidade foram $v_c \times f_z$, $v_c \times v_b$ e $f_z \times v_b$;
- Quanto à análise de variância da resposta rugosidade R_t , as variáveis mostram que o avanço por dente (f_z), o desgaste de flanco (v_b), a profundidade de usinagem (a_p) e vazão de fluido (Q) influenciaram significativamente na rugosidade. Todos os termos quadráticos foram significativos. As interações significativas para a rugosidade foram $v_c \times f_z$, $v_c \times v_b$, $f_z \times v_b$, $f_z \times Q$, $a_e \times v_b$ e $a_p \times v_b$;
- A partir das interações entre as variáveis de controle e de ruído, foi possível avaliar a robustez das características de interesse em relação às variáveis de ruído sendo possível estabelecer as equações de média e variância como as equações do EQM para as características de interesse;
- Após a otimização do EQM, a otimização robusta biobjetivo foi realizada. Assim, 21 soluções Pareto-ótimas foram obtidas. Estas soluções possibilitaram

explorar diferentes cenários robustos às variáveis de ruído consideradas neste trabalho, obtendo resultados satisfatórios em relação à qualidade superficial;

Os experimentos de confirmação com os níveis ótimos das variáveis de controle: são: $v_c = 61,19$ m/min, $f_z = 0,15$ mm/dente, $a_p = 0,90$ mm e $a_e = 16,30$ mm, alcançaram as respostas de $R_a = 0,4531$ μm e $R_t = 3,2593$ μm . Assim, pode ser constatada a robustez do processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205, mitigando a influência da vazão do fluido de corte, do desgaste da ferramenta e da concentração do fluido na rugosidade da peça.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para estudos futuros, ficam as seguintes considerações:

1. Comparar os resultados dos tipos de fresamento, concordante com o discordante deste mesmo aço, usando combinações similares;
2. Emprego do erro quadrático médio (EQM) neste mesmo aço, considerando outros ruídos como vibração e temperatura, visando testar a aplicabilidade do método;
3. Realizar uma comparação de ferramentas inteiriças de metal duro com ferramentas de insertos intercambiáveis nas respostas R_a e R_t ;
4. Comparar o mesmo processo de fresamento utilizando ferramentas com ângulo 45 graus e mesmas combinações;
5. Comparar as respostas, utilizando as mesmas combinações, para o aço inoxidável super duplex 2507.

REFERÊNCIAS

ABADIE, J.; CARPENTIER, J. Generalization of the Wolfe reduced-gradient method to the case of nonlinear constraints. **Optimization, Academic Press**, New York, p. 37-47, 1968.

AGGEN, G., et al. **ASM Handbook, volume 1, properties and selection: irons, steels, and high performance alloys**. Califórnia: ASM International, 1990. ISBN 9780871703774.

AHMED, Y. S., et al. Investigation of Coated Cutting Tool Performance during Machining of Super Duplex Stainless Steels through 3D Wear Evaluations. **Coatings**, v. 7, n. 8, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/coatings7080127>>. Acesso em: 18 jun. 2023.

AIRAO, J. et al. An Experimental Study of Surface Roughness Variation in End Milling of Super Duplex 2507 Stainless Steel. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 2, p. 3682-3689, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.619>>. Acesso em: 18 jun. 2023.

ALMEIDA, D. O. et al. Influência da direção de aplicação do fluido de corte na temperatura da interface cavaco-ferramenta. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 4., 2006. Gravataí. **Anais do Congresso...** Gravataí: ABCM, 2007. Disponível em: <<https://www.abcm.org.br/anais/cobef/2007/files/011106303.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

ALMEIDA, F. A. et al. Robust parameter project applied to the optimization of the steel turning process AISI 12L14. In.: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICS AND MATERIALS IN DESIGN, 7., 2017, Albufeira. **Proceedings...** Albufeira: INEGI/FEUP, 2017. p. 1397-1400. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~m2d/Proceedings_M2D2017/data/papers/6701.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2023.

AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/3791>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

ANGIULI, R.; GIANNUZZI, M.; PAPADIA, G. Experimental thermographic investigation for dry finish turning of SAF 2507 steel. In.: INTERNATIONAL ESAFORM CONFERENCE ON MATERIAL FORMING, 22., 2019, Vitoria-Gasteiz. **AIP Conference Proceedings**. Vitoria-Gasteiz: AIP Publishing LLC, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.5112612>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

ARISOY, C. F.; BAŞMAN, G.; ŞEŞEN, M. K. Failure of a 17-4 PH stainless steel sailboat propeller shaft. **Engineering Failure Analysis**, v. 10, n. 6, p. 711-717, 2003. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S1350-6307\(03\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S1350-6307(03)00041-4)>. Acesso em: 19 jun. 2023.

ASLAN, A. et al. Modeling of Cutting Parameters and Tool Geometry for Multi-Criteria Optimization of Surface Roughness and Vibration via Response Surface Methodology in Turning of AISI 5140 Steel. **Materials**, v. 13, n. 19, p. 4242, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma13194242>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

ASM Handbook Committee. **ASM Handbook: Volume 13A- Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection**. 9 ed. New York: ASM International, 1992

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6405, NB 93 - Rugosidade das superfícies**. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 4287 - Especificações geométricas do produto (GPS)**. Rio de Janeiro, 2002

BABU, M. N. et al. End milling of AISI 304 steel using Minimum Quantity Lubrication. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, 138, p. 681-689, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.064>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

BAERE, Kris de. et al. Assessment of corrosion resistance, material properties, and weldability of alloyed steel for ballast tanks. **Journal of Marine Science and Technology (Japan)**, v. 22, n. 1, p. 176-199, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00773-016-0402-1>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

BATISTA, S. R. F.; KURI, S. E.; GONÇALVES, R. S. Considerações sobre PREN (Pitting Resistance Equivalent Number) e Fase Sigma na resistência à corrosão de um aço inoxidável duplex. In.: INTERCORR, 2014, Fortaleza (CE). **Anais Intercorr...** Rio de Janeiro: Abraco, 2014. Disponível em: <https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2014/INTERCORR2014_134.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2023.

BERGUIGA, T.; BOUMERZOU, Z. Effect of sigma phase precipitation on mechanical behavior and pitting corrosion of duplex stainless steel. **Acta Metallurgica Slovaca**, v. 25, n. 1, p. 4-17, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.36547/ams.25.1.1>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

BHISE, V. Y.; JOGI, B. F. Experimental investigation and theoretical modelling of P20 Steel by using CNC end milling machining process. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1854, n. 1, p. 012011, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1854/1/012011>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

BLACK, J. T.; KOHSER, R. **Degarmo's Materials and Processes in Manufacturing**. 10 ed. New York: John Wiley & Sons, 2008.

BORGES, Douglas Silva; PEREIRA, Sidnei. Otimização e gerenciamento dos parâmetros de corte em usinagem. In.: CONGRESSO INTERNACIONAL: O MUNDO EM DISRUPÇÃO, 5., 2019, Varginha (MG). **Anais...** Varginha: UNIS-MG, 2019. Disponível em:

<<https://www.even3.com.br/anais/Vci/149287-OTIMIZACAO-E-GERENCIAMENTO-DOS-PARAMETROS-DE-CORTE-EM-USINAGEM>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

BOUZID, W.; ZGHAL, A.; SAI, L. Taguchi method for design optimisation of milled surface roughness. **Materials Technology**, v. 19, n. 3, p. 159-162, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10667857.2004.11753079>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

BOX, G. E. P.; WILSON, K. B. On the experimental attainment of optimum conditions. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)**, v. 13, n. 1, p. 1-38, 1951. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1951.tb00067.x>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

BOX, G.; BISGAARD, S.; FUNG, C. An explanation and critique of taguchi's contributions to quality engineering. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 4, n. 2, p. 123-131, 1988. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/qre.4680040207>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS ISO 513:2004 - Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges - Designation of the main groups and groups of application**. Londres, 2004

BRITO, T. G de. et al. Otimização da rugosidade Rt no fresamento de topo do aço ABNT 1045 usando Projeto de Parâmetros Robustos (PPR). In.: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA (CONEM), 8., 2014, Uberlândia (MG). **Anais...** Uberlândia: ABCM, 2014. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/281442863>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

BRITO, T. G. et al. Optimization of AISI 1045 end milling using robust parameter design. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 84, p. 1185-1199, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7764-0>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

BRITO, Tarcísio Gonçalves de. **Otimização do fresamento de topo do aço ABNT 1045 utilizando projeto de parâmetro robusto**. 2012. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/958>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

BRYMAN, Alan. **Research methods and organization studies**. London: Loughborough University, 2005.

CHING-KAO, C.; LU, H. S. The optimal cutting-parameter selection of heavy cutting process inside milling for SUS304 stainless steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 34, p. 440-447, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-006-0630-3>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

DAI, L.; TANG, M.; SHIN, S. Stackelberg game approach to a bi-objective robust design optimization. **Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculos y Diseño En**

Ingeniería, v. 37, n. 3, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.23967/j.rimni.2021.09.008>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

DAVIM, J. P. **Surface integrity in machining**. London: Springer, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-1-84882-874-2>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

DAVIS, J. R. **ASM Specialty Handbook: stainless steels**. 3 ed. Elgin: ASM International, 1994.

DENKENA, B.; KRÖDEL, A.; ELLERSIEK, L. Influence of metal working fluid on chip formation and mechanical loads in orthogonal cutting. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 118, p. 3005-3013, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-021-08164-2>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

DIB, M. H. M.; JASINEVICIUS, R. G.; BENJAMIN, G. M. Uma análise experimental do fresamento discordante e concordante. **Revista Iuminart**, n. 13, 2015. Disponível em: <<http://revistailuminart.ti.srt.ifsp.edu.br/index.php/iluminart/article/view/271>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 9 ed. São Paulo: ArtLiber, 2014

DIRVIYAM, P. S.; PALANISAMY, C.; RAJESH, P. K. Prediction of surface roughness in end milling operation of duplex stainless steel using response surface methodology. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 10, n. 3, p. 340-352, 2015. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/282060733>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

ĐUROVIĆ, S. et al. Modeling and prediction of surface roughness in the end milling process using multiple regression analysis and artificial neural network. **Tribology in Industry**, v. 44, n. 3, p. 540-549, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.24874/ti.1368.07.22.09>>. Acesso em: 20 jun. 2022.

FAN, Y. et al. Utilization of stainless-steel furnace dust as an admixture for synthesis of cement-based electromagnetic interference shielding composites. **Scientific Reports**, v. 7, n. 15368, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-017-15779-7>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1969.

FERREIRA, F. G. D. C. **Estudo comparativo de modelos e técnicas para otimização de portfólios com restrição de cardinalidade**. 2018. 117 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <<https://sig.cefetmg.br/sigaa/verArquivo?idArquivo=2050191&key=f626a8a2e9d6100f0f2e7b37d8143312>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

FIGUEIREDO, G. X. A.; BORDINASSI, É. C. Estudo da rugosidade e vida de ferramenta no aço inoxidável super duplex ASTM A 890 após fresamento em diferentes condições de lubrificação. In.: SEMINÁRIO MAUÁ DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 5., 2013, São Caetano do Sul. **Anais...** São Caetano do Sul: Instituto Mauá de Tecnologia, 2013. p. 1-10. Disponível em: <<https://maua.br/files/032015/206726093-ESTUDO-DA-RUGOSIDADE-E-VIDA-DE-FERRAMENTA-DO-ACO-INOXIDAVEL-SUPERDUPLEX-ASTM-A-890-APOS-FRESAMENTO-EM-DIFERENTES-CONDICOES-DE-LUBRIFICACAO.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

GALDÁMEZ, E. V. C. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. Disponível em: <<https://doi:10.11606/D.18.2002.tde-18112002-090421>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

GAMARRA, José Roberto. **Estratégias de usinagem no torneamento de aço inoxidável super duplex (UNS S32750)**. 2017. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/20.500.12733/1631602>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

GARCIA, R.; POLICENA, M. R.; SOUZA, A. J. Análise da rugosidade obtida no fresamento frontal do Aço Inoxidável Duplex Forta DX 2205. In.: BRAZILIAN CONGRESS ON MANUFACTURING ENGINEERING, 11., 2021. **Proceedings...** Brasília: ABCM, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.26678/ABCM.COBEP2021.COB21-0034>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

GEORGE, P. K. L. D. W. et al. Influence of Cutting Parameters on Machinability of DSS 2205 and SDSS 2507 Materials During Milling. **International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering**, v. 12, n. 1, p. 1-19, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.4018/IJMMME.299061>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

GOUARIR, A. et al. In-process tool wear prediction system based on machine learning techniques and force analysis. **Procedia CIRP**, v. 77, p. 501–504, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.253>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

GOUVEIA, R. et al. Machining duplex stainless steel: comparative study regarding end mill coated tools. **Coatings**, v. 6, n. 4, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/coatings6040051>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

GROUS, A. **Applied metrology for manufacturing engineering**. New York: John Wiley & Sons, 2011.

GRZESIK, W. **Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling, and applications**. 2 ed. Amsterdam: Elsevier, 2016.

GUARNIZO, R. A. L. **Desenvolvimento de um método para a geração de trajetórias para o fresamento de cavidades em peças prismáticas com múltiplas ferramentas**. 2012. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade

Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/101038>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

GUNN, R. N. (Ed.) **Duplex stainless steels: microstructure, properties and applications** New York: Abington PubliShing, 1997. ISBN 9781855733183.

HANIF, M. et al. Investigating the effects of electric discharge machining parameters on material removal rate and surface roughness on AISI D2 steel using RSM-GRA integrated approach. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 101, p. 1255-1265, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-018-3019-1>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

HAYAJNEH, M.; TAHAT, M.; JOACHIM, B. A Study of the Effects of Machining Parameters on the Surface Roughness in the End-Milling Process. **Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering**, v. 1, n. 1, p. 1-5, sep. 2007. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/26527438>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

INTERNATIONAL MOLYBDENUM ASSOCIATION. **Orientações práticas para processamento dos aços inoxidáveis Duplex**. 3 ed. Munique: Associação Internacional do Molibdênio, 2012. ISBN 9781907470073. Disponível em: <https://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/Duplex_Stainless_Steel_Portuguese.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2023.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 2632-1:1975 - Roughness comparison specimens - Part I: turned, ground, bored, milled, shaped and planed**. Newark, 1975. Disponível em: <<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/598334a9-7990-4782-b26b-eda6b190600e/iso-2632-1-1975>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 3685:1993 - Tool-life testing with single-point turning tools**. Newark, 1993. Disponível em: <<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/e5290d9a-7928-4af4-bdba-219cb070bb15/iso-3685-1977>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 8688-1:1989 - Tool life testing in milling - Part 1: Face milling**. Newark, 1989. Disponível em: <<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/e1e300ba-0561-442e-96b4-e22e36234f60/iso-8688-1-1989>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 8688-2:1989 - Tool life testing in milling - Part 2: End milling**. Newark, 1989. Disponível em: <<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/fcfc12ce-1d33-4e59-92a8-f45fcfecc6b4/iso-8688-2-1989>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

JACYNA, J.; KORDALEWSKA, M.; MARKUSZEWSKI, M. J. Design of Experiments in metabolomics-related studies: An overview. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, v. 164, p. 598-606, fev. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jpba.2018.11.027>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

JEBARAJ, A. V. et al. Weldability, machinability and surfacing of commercial duplex stainless steel AISI2205 for marine applications: a recent review. **Journal of Advanced Research**, v. 8, n. 3, p. 183-199, maio 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.01.002>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

KALIDASS, S.; PALANISAMY, P. Experimental investigation on the effect of tool geometry and cutting conditions using tool wear prediction model for end milling process. **Journal of Advanced Manufacturing Systems**, v. 13, n. 1, p. 41-54, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1142/S0219686714500036>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

KARIMIFARD, S.; MOGHADDAM, M. R. A. Application of response surface methodology in physicochemical removal of dyes from wastewater: a critical review. **Science of the Total Environment**, v. 640-641, p. 772-797, nov. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.355>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

KATNA, R.; SUHAIB, M.; AGRAWAL, N. Nonedible vegetable oil-based cutting fluids for machining processes – a review. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 35, n. 1, p. 1-32, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1697446>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

KHAWAJA, A. UL H.; JAHANZAIB, M.; MUNAWAR, M. Optimizing the performance of high-speed machining on 15CDV6 HSLA steel in terms of green manufacturing using response surface methodology and artificial neural network. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 22, n. 6, p. 1125-1145, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12541-021-00520-2>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

KLEIJNEN, J. P. C. Experimental design for sensitivity analysis, optimization, and validation of simulation models. In.: J. Banks (Ed.). **Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice**. New York: John Wiley & Sons, 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/9780470172445>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

KÖKSOY, O.; YALCINOZ, T. Mean square error criteria to multiresponse process optimization by a new genetic algorithm. **Applied Mathematics and Computation**, v. 175, n. 2, p. 1657-1674, abr. 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.amc.2005.09.011>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

KOYEE, R. D. et al. Experimental investigation and multiobjective optimization of turning duplex stainless steels. **International Journal of Manufacturing Engineering**, v. 2014, p. 1-13, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2014/921081>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

KRISHNAPRASAD, K.; SUMESH, C. S.; RAMESH, A. Numerical modeling and multi objective optimization of face milling of AISI 304 steel. **Journal of Applied and Computational Mechanics**, v. 5, n. 4, p. 749-762, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.22055/JACM.2019.27528.1414>>. Acesso em: 22 jun. 2023.

KULL NETO, Henrique. **Estudo das estratégias de usinagem visando a minimização da vibração no fresamento de superfícies convexas**. 2016. 156 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de

Campinas, Campinas, SP. 2016. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/20.500.12733/1629441>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

KUMAR, R. S.; KUMAR, S. D.; RAJKUMAR, S. Multi-response optimization of AISI H11 using Taguchi and Grey relational analysis. **Materials Research Express**, v. 9, n. 10, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac95fe>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

KWON, Y. M. Robust Design to the Combined Array with Multiresponse. **Journal of the Chosun Natural Science**, v. 10, n. 1, p. 51-57, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.13160/ricns.2017.10.1.51>>. Acesso em: 22 jun. 2023.

LASDON, L. S. et al. Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Programming. **ACM Transactions on Mathematical Software**, v. 4, n. 1, p. 34-50, 1978. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/355769.355773>>. Acesso em: 22 jun. 2023.

LEBENSZTAJN, L.; COULOMB, J. L. TEAM workshop problem 25: A multiobjective analysis. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 40, n. 2, p. 1402-1405, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.824545>>. Acesso em: 22 jun. 2023.

LISBOA, F. C.; MORAES, J. J. B.; HIRASHITA, M. A. Fluidos de corte: uma abordagem geral e novas tendências. In.: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 33., 2013, Salvador. **Anais do Congresso...** Salvador: Enegep, 2013. Disponível em: <https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2013_TN_STO_185_056_23095.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2023.

LLEWELLYN, D. T.; HUDD, R. C. **Steels: metallurgy and applications**. 3 ed. New York: Butterworth-Heinemann, 1998.

LONDERO, F. O. **Avaliação de desgastes em ferramentas de metal duro revestido no torneamento do aço SAE 5160 esferoidizado**. 2014. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Ciências Exatas da Natureza e de Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ucs.br/handle/11338/1937>>. Acesso em: 22 jun. 2023.

LYU, W. et al. Modelling and prediction of surface topography on machined slot side wall with single pass end milling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 124, p. 1095-1113, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-022-10587-4>>. Acesso em: 22 jun. 2023.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2009.

MAKADIA, A. J.; NANAVATI, J. I. Optimization of machining parameters for turning operations based on response surface methodology. **Measurement: Journal of the**

International Measurement Confederation, v. 46, n. 4, p. 1521-1529, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.11.026>>. Acesso em: 22 jun. 2023.

MASHKOMPLEKT. **DIN EN ISO 4766: gewindestifte mit schlitz und kegelstumpf**. Moscou, 2011.

MAVI, A. Evaluation of cutting parameters by determination of the grey correlation analysis methods of the effects on the cutting force and surface roughness of duplex stainless steels (2205). **Tehnicki Vjesnik**, v. 27, n. 1, p. 270-275, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.17559/TV-20181220075328>>. Acesso em: 22 jun. 2023.

MINITAB. **Como a estatística de Anderson-Darling é usada para avaliar o ajuste de distribuição**. 2021. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/20/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/capability-analysis/supporting-topics/distributions-and-transformations-for-nonnormal-data/anderson-darling-and-distribution-fit/>>. Acesso em: 22 jun. 2023.

MITUTOYO CORPORATION. **Medidor de Rugosidade Superficial Modelo Surftest SJ-210**: Manual do Usuário. Suzano, Mitutoyo Sul Americana, 2023.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2012. Disponível em: <<https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2023.

MOHAMMED, B. S.; KHED, V. C.; NURUDDIN, M. F. Rubbercrete mixture optimization using response surface methodology. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 1605-1621, jan. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.102>>. Acesso em: 22 jun. 2023

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 9 ed. New York: John Wiley & Sons, 2017

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

MOOD, A. M. **Introduction to the Theory of Statistics**. 3 ed. New York: McGraw-Hill, 1974.

MOREIRA, F. R. **Otimização robusta multiobjetivo para o projeto de sistemas em Engenharia**. 2015. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.14393/ufu.te.2015.41>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

MORELO, F. **Análise da influência do mandrilamento na integridade superficial do aço inoxidável super duplex**. 2014. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de

Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1147>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. 4 ed. New York: Wiley, 2016.

NAROOEI, K. D.; RAMLI, R. Optimal selection of cutting parameters for surface roughness in milling machining of AA6061-T6. **International Journal of Engineering**, v. 35, n. 6, p. 1170-1177, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.5829/IJE.2022.35.06C.08>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

OLIVEIRA, C. H.; et al. Análise da rugosidade Ra no fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 utilizando planejamento de experimentos. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 10., 2006. São Carlos. **Anais do Congresso...** São Carlos: ABCM, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.26678/ABCM.COBEP2019.COF2019-0525>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

OLIVEIRA, Carlos Henrique de. et al. Otimização robusta da rugosidade Rt no fresamento de topo do Aço Inoxidável Duplex UNS S32205. In.: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 15., 2022. Madrid. **XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica**. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2022. Disponível em: <<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

OLIVEIRA, L. G. et al. Nonlinear optimization strategy based on multivariate prediction capability ratios: Analytical schemes and model validation for duplex stainless steel end milling. **Precision Engineering**, v. 66, p. 229-254, nov. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.06.005>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

PADILLA-MORALES, L. D. et al. Obtaining optimal operation rules by means of evolutionary computation and GRG algorithms: Cointzio Dam, Michoacán, México. **Tecnología y Ciencias Del Agua**, v. 13, n. 2, mar./abr. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2022-02-08>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

PAIVA, A. P. et al. A multivariate mean square error optimization of AISI 52100 hardened steel turning. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 43, p. 631-643, ago. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-008-1745-5>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

PAIVA, A. P. et al. A multivariate robust parameter design approach for optimization of AISI 52100 hardened steel turning with wiper mixed ceramic tool. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 30, n 1, p. 152-163, jan. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2011.08.001>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

PAIVA, A. P. et al. A multivariate robust parameter optimization approach based on Principal Component Analysis with combined arrays. **Computers and Industrial Engineering**, v. 74, p. 186-198, ago. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.05.018>>. Acesso em: 26 jun. 2023

PARSI, P.K. et al. Machinability evaluation of coated carbide inserts in turning of superduplex stainless steel. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 1933, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s42452-020-03570-9>>. Acesso em: 30 jun. 2023.

PATIL, V. T. **Metrology and quality control**. 15 ed. Shivaji Nagar: Nirali Prakashan, 2018.

PEREIRA, R. B. D. **Otimização robusta multi-objetivo do processo de fresamento helicoidal do aço AISI H13 endurecido pelo método da restrição normal**. 2017. 320f. Tese (doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1057>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

PERUCHI, R. S. et al. A Metodologia de Superfície de Resposta como ferramenta de modelagem e otimização do processo de fresagem de topo de aços: uma revisão. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 10., 2020. **Anais do Conbrepro...** Paraná: Aprepro, 2020. Disponível em: <<https://aprepro.org.br/conbrepro/2020/anais>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

PICKERING, F. B. Physical Metallurgy of Stainless-Steel Developments. **International Metal Reviews**, Review, n. 211, p. 227-268, dec. 1976.

PLUMMER, J. D.; DEAL, M. D.; GRIFFIN, P. B. **Silicon LVSI technology: fundamentals, practice and modeling**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000. ISBN 0130850373

POLICENA, M. R. et al. Surface roughness analysis in finishing end-milling of duplex stainless steel UNS S32205. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 98, p. 1617-1625, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2356-4>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

QUIMATIC TAPMATIC DO BRASIL. **Soluções químicas para manutenção e produção industrial**. Barueri: Quimatic Tapmatic do Brasil, 2012.

QUINTANA, G.; GARCIA-ROMEU, M. L.; CIURANA, J. Surface roughness monitoring application based on artificial neural networks for ball-end milling operations. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 22, p. 607-617, ago. 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10845-009-0323-5>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

QUINTEN, M. A. **Practical guide to surface metrology**. Cham: Springer, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-3-030-29454-0>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J.; AGOSTINHO, O. L. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2020.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 3 ed. Campinas: Cárita, 2014.

ROSAL, M. C. F. (2007). **Programação não-linear aplicada à otimização de redes pressurizadas de distribuição de água**. 2007. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5609>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

SANDVIK COROMANT. **Guia técnico: fresamento**. Jundiaí: AB Sandvik Coromant, 2023. p. 2-197.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber, 2007.

SCANDIFFIO, I.; DINIZ, A. E.; SOUZA, A. F. Evaluating surface roughness, tool life, and machining force when milling free-form shapes on hardened AISI D6 steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 82, p. 2075-2086, feb. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7525-0>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

SENATORE, M.; FINZETTO, L.; PEREA, E. Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 60, n. 1, p. 175-181, mar. 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0370-44672007000100027>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

SEVERINO, G. **Otimização do torneamento vertical de anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico utilizando ferramenta de metal duro com geometria especial**. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1321>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

SHIJIN, M.; NAZAR, K. P. A. Multi Objective Parameter Optimization of End Milling Operation on AA5083. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND RENEWABLE ENERGY APPLICATIONS (PEREA), 2020. **Proceedings...** Kannur: IEEE, 2020. p. 1-6. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/PEREA51218.2020.9339802>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

SHIN, S. et al. Computing trade-offs in robust design: Perspectives of the mean squared error. **Computers and Industrial Engineering**, v. 60, n. 2, p. 248-255, mar. 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.11.006>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

SHOEMAKER, A. C.; TSUI, K.-L.; WU, C. F. J. Economical Experimentation Methods for Robust Design. **Technometrics**, v. 33, n. 4, p. 415-427, 1991. Disponível em: <<https://doi.org/10.2307/1269414>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

SILVA, A. F. et al. Multi-objective optimization and finite element method combined with optimization via Monte Carlo simulation in a stamping process under uncertainty. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 117, p. 305-327, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-021-07644-9>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 1988.

SORTE, R. T. B. **Influência do fluido de corte na usinagem de polímeros**. 2020. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2020. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/24088>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

SOUTO, U. B. **Tool wear monitoring in the milling process by acoustic emission**. 2007. 40 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14788>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

SOUZA, L. G. P. et al. Evaluation of trade-off between cutting time and surface roughness robustness regarding tool wear in hard turning finishing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 123, p. 3047-3078, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-022-10354-5>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

STANOJKOVIĆ, J.; RADOVANOVIĆ, M. Influence of the cutting parameters on force, moment and surface roughness in the end milling of aluminum 6082-T6. **Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering**, v. 20, n. 1, p. 157-165, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.22190/FUME180220002S>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

SURESH, R. et al. Effect of Process Parameters on Cutting Forces and Surface Roughness in Machining of DSS 2205 Using Taguchi's Approach. **Applied Mechanics and Materials**, v. 895, p. 26-31, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.895.26>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4 ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000

UHLMANN, E. et al. Substitution of coolant by using a closed internally cooled milling tool. **Procedia CIRP**, v. 61, p. 553-557, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.267>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

VARUN, S.; PARKHI, S. Optimization of multiple process parameter of milling (multi-objective) on AISI 202 stainless steel using Taguchi based grey relational analysis. **International Journal of Engineering Trends and Technology**, v. 68, n. 10, p. 81-86, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V68I10P214>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

VAZIFEH, Y.; JORJANI, E.; BAGHERIAN, A. Optimization of reagent dosages for copper flotation using statistical technique. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 20, n. 12, p. 2371-2378, dec. 2010. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(10\)60657-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(10)60657-7)>. Acesso em: 27 jun. 2023.

VINING, G. G.; MYERS, R. H. Combining taguchi and response surface philosophies: a dual response approach. **Journal of Quality Technology**, v. 22, n. 1, p. 38-45, 1990. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00224065.1990.11979204>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

VOSNIAKOS, G. C.; KALATTAS, A.; SIASOS, A. Optimal process planning for helical bevel gears using Taguchi design of simulated machining experiments. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 232, n. 14, p. 2627-2640, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0954405417699010>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

WAREN, A. D.; LASDON, L. S. Status of Nonlinear Programming *Software*. **Operations Research**, v. 27, n. 3, p. 431-456, 1979. Disponível em: <<https://doi.org/10.1287/opre.27.3.431>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

WELCH, W. J. et al. Computer experiments for quality control by parameter design. **Journal of Quality Technology**, v. 22, n. 1, p. 15-22, 1990. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00224065.1990.11979201>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

WHITEHOUSE, D. J. Surface metrology. **Measurement Science and Technology**, v. 8, n. 9, p. 955-972, 1997. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0957-0233/8/9/002>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

WOLFE, P. S. Methods for linear constraints. In.: ABADIE, J. (Ed.). **Nonlinear programming**. New York: Wiley, 1967. p. 99-131.

WOLFE, P. S. Methods of nonlinear programming. In.: GRAVES, R. L.; WOLFE, P. (Eds.). **Recent advances in mathematical programming**. New York: McGraw-Hill, 1963. p. 76-77.

XU, Z.; WANG, Y. Study on cutting force and surface quality during slot milling of CFRP based on equivalent milling area. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 123, p. 3377-3386, dec. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10411-z>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

ZAHOOR, S. et al. Environmentally conscious machining of Inconel 718: surface roughness, tool wear, and material removal rate assessment. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 106, p. 303-313, jan. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04550-z>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

ZHANG, J. Z.; CHEN, J. C.; KIRBY, E. D. Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 184, n. 1-3, p. 233-239, apr. 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.029>>. Acesso em: 27 jun. 2027.

ZHOU, L., et al. An improved cutting power model of machine tools in milling process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 91, p. 2383-2400, jul. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-016-9929-x>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

ARTIGOS PUBLICADOS EM CONGRESSOS

XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica
XV Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica
Madrid, España, 22-24 de noviembre de 2022



Otimização no processo de fresamento do aço inoxidável duplex UNS S32205 utilizando Grey Relational Analysis

Wander Pinto Ribeiro¹, Harue Genghini Shibuta², Bárbara Salvador Barros da Silva³, Carlos Henrique de Oliveira⁴, Tarcisio Gonçalves de Brito⁵, Leonardo Albergaria de Oliveira⁶

¹Instituto de Engenharias Integradas (IEI), Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: d2021100950@unifei.edu.br

²Instituto de Engenharias Integradas (IEI), Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: harueshibuta@unifei.edu.br

³Instituto de Engenharias Integradas (IEI), Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: d2019010014@unifei.edu.br

⁴Instituto de Engenharias Integradas (IEI), Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: carlos.henrique@unifei.edu.br

⁵Instituto de Engenharias Integradas (IEI), Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: tgbrito@unifei.edu.br

⁶Instituto de Engenharias Integradas (IEI), Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: leoalber@unifei.edu.br

<https://doi.org/10.5944/bicim2022.177>



12º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação
10 a 12 de maio de 2023, Brasília, DF, Brasil

COBEF2023-0327 - OTIMIZAÇÃO DE MÉDIA E VARIÂNCIA DA RUGOSIDADE R_a NO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205

Wander Pinto Ribeiro
Gustavo Rocha de Queiroz
Harue Genghini Shibuta
Carlos Henrique de Oliveira
Leonardo Albergaria de Oliveira
Tarcisio Gonçalves de Brito

IEI-UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá. *Campus Theodomiro Carneiro Santiago*. Rua Irmã Ivone Drummond, n° 200.
CEP: 35903-087. Itabira-MG
wander.p.ribeiro@gmail.com
gustavoqueiroz@unifei.edu.br
harueshibuta@unifei.edu.br
carlos.henrique@unifei.edu.br
leoalber@unifei.edu.br
tgbrito@unifei.edu.br

<https://scholar.google.com/citations?user=pGnjIQgAAAAJ&hl=pt-BR>

ARTIGO SUBMETIDO EM JOURNAL (COGENT ENGINEERING)

Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

Dear WANDER PINTO RIBEIRO,

Thank you for your submission.

Submission ID	239856350
Manuscript Title	OPTIMIZATION OF END MILLING OF DUPLEX STAINLESS STEEL UNS S32205, WITH NOISE FACTOR ANALYSIS
Journal	Cogent Engineering
Article Publishing Charge (APC)	USD \$1270.00 (plus VAT or other local taxes where applicable in your country)

**APC only payable if your article is accepted*

You can check the progress of your submission, and make any requested revisions, on the [Author Portal](#).

Thank you for submitting your work to our journal.

If you have any queries, please get in touch with OAEN-peerreview@journals.tandf.co.uk.

For any queries relating to your APC, please get in touch with APC@tandf.co.uk

Kind Regards,
Cogent Engineering Editorial Office